Wood Stoves 2020 FKZ: 22016813 (TFZ), FKZ 22017213 (K+W)

Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe



Entwicklung der nächsten Generation sauberer Holzöfen (Akronym: Wood Stoves 2020)

Detaillierter Schlussbericht

Autoren

Robert Mack (TFZ) Florian Volz (K+W) Dr. Hans Hartmann (TFZ)

Förderkennzeichen 22016813, 22017213

Straubing, 31. Januar 2018

Entwicklung der nächsten Generation sauberer Holzöfen (Akronym: Wood Stoves 2020) – Detaillierter Schlussbericht

Projektleiter:	Dr. Hans Hartmann
Autoren:	Robert Mack, Florian Volz, Dr. Daniel Kuptz, Dr. Hans Hartmann
Mitarbeiter:	Elisabeth Rist, Benedikt Haas, Albert Maierhofer, Stephan Winter, Alexander Marks, Thomas Kiesslinger

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft unter dem Förderkennzeichen 22016813 gefördert. Mittelvergabe erfolgte über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Die Projektlaufzeit ging vom 01.08.2014 bis zum 31.07.2017. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

© 2017 Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil <1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

Hrsg.:	Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail:	poststelle@tfz.bayern.de
Internet:	www.tfz.bayern.de
Redaktion:	Robert Mack, Florian Volz, Dr. Hans Hartmann
Verlag:	Eigenverlag
Erscheinungsort:	Straubing
Erscheinungsjahr:	2017
Gestaltung:	Mack, Hartmann
Fotonachweis:	Mack

Inhaltsverzeichnis

Abbild	ungsverzeichnis	9
Tabelle	enverzeichnis	13
1	Einleitung	15
2	Stand der Technik	.17
2.1	Typischer Aufbau eines modernen Kaminofens	17
2.2	Anzahl an Einzelraumfeuerungen in der Bundesrepublik Deutschland	18
2.3	Rechtlicher Hintergrund	20
2.4	Einflüsse auf das Emissionsverhalten von Kaminöfen	22
3	Zielsetzung und Aufbau des Projektes	25
4	Teilvorhaben 1: Aufgabenschwerpunkte am TFZ	29
4.1	Material und Methoden	29
4.1.1	Beschreibung der verwendeten Feuerungen	29
4.1.2 4.1.3	Prüfstandsaufbau und Messtechnik Bestimmung von Wassergehalt, Glühverlust, Aschegehalt und Elementaranalyse	29
4.1.4	Eingesetzte Filter-, Dummy- und Katalysatorelemente	31
4.1.5	Eingesetzte Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbegrenzer	33
4.1.6	Abgestimmte Prüfmethode für optimierte Ofenkonzepte und Bauteile zur	~ .
117	Optimierung von Ofen	34
4.1.7		40
4.2	Test und Bewertung des Langzeitverhaltens von Schaumkeramikfiltern in Kaminöfen und deren Ersatz durch	
	Katalysatoren.	46
4.2.1	Vorversuche zur Luftströmung innerhalb des Kaminofens	46
4.2.2	Langzeitverhalten von nicht-katalytisch-beschichteten	
	Schaumkeramikelementen	47
4.2.3	Ersatzes der Schaumkeramikelemente durch katalytisch beschichtete	50
424	Langzeitverhalten des Katalysators	50
4.2.5	Zusammenfassende Bewertung (katalytische vs. nicht-katalytische	62
4.2		02
4.3	wuantifizierung von Stillstandsverlusten über den Schornstein sowie Bewertung von Minderungsmaßnahmen an Öfen	63
431	Kalte Stillstandsverluste	دی. دع
4.3.2	Verluste während des Abkühlvorgangs nach dem Betrieb des Kaminofens	
	(warme Stillstandverluste)	68
4.3.3	Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung von Stillstandsverlusten	72

8

4.4	Prüfung und Bewertung von nachrüstbaren Verbrennungsluftsteuerungen und Zugluftbegrenzern	75
4.4.1	Einfluss der nachrüstbaren Steuerungen und Zugluftbegrenzer auf das Emissionsverhalten	77
4.4.2	Einfluss der nachrüstbaren Steuerungen und Zugbegrenzer auf den Wirkungsgrad von Kaminöfen	. 82
4.4.3	Zusammenfassende Bewertung der Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbegrenzer	. 84
4.5	Methodenvergleich zur Untersuchung der unverbrannten Rückstände aus Kaminöfen hinsichtlich ihres Energieinhaltes	. 86
4.5.1 4.5.2	Vergleich von Analysemethoden für unverbrannte Rückstände Zusammenfassende Bewertung der Methoden zur Rückstandsbewertung	. 86 . 92
4.6	Einflusses des Förderdrucks auf Wirkungsgrad und Emissionen	. 93
4.6.1 4.6.2	Einfluss des Förderdrucks auf Emissionen Einfluss des Förderdrucks auf den Wirkungsgrad	. 93 . 96
5	Teilvorhaben 2: Aufgabenschwerpunkte der Kutzner + Weber GmbH	. 99
5.1	Entwicklung einer automatischen Abgasklappe zur Minimierung von Stillstandsverlusten	. 99
5.1.1 5.1.2	Stand der Technik Prototyp der temperaturgesteuerten motorischen Zuluftklappe	. 99 102
5.2	Weiterentwicklung der Ofensteuerung zur selbstadaptierenden Ofensteuerung	103
5.2.1 5.2.2 5.2.3	Stand der Technik Ofensteuerung Kompakt bei K + W Weiterentwicklung Selbstadaption und Nachlegezeitpunkt Prototyp selbstadaptive Ofensteuerung	103 105 108
Zusamı	nenfassung	115
Queller	verzeichnis	119
Anhang A: Gemeinsamer englischsprachiger Abschlussbericht aller Partner zum ERANET-Gesamtvorhaben		

Anhang B: Guidelinesfor Low Emission and High Efficiency Stove Concepts

Anhang C: Guidelines for automated control systems for stoves

Anhang D: Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM)

Abbildungsverzeichnis

17
23
24
25
30
32
32
33
36
39
41
45
47
48
49
49
51

Abbildung 18:	Vergleich der Nicht-Methan Kohlenwasserstoff-Emissionen mit Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ_{Dummy}) 52
Abbildung 19:	Vergleich der CH ₄ Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ_{Dummy})
Abbildung 20:	Maximale und minimale Temperaturen sowie durchschnittliche Temperaturen während der Messung bei Nenn- bzw. Teillast
Abbildung 21:	Vergleich der Gesamtstaubemissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ_{Dummy})
Abbildung 22:	Vergleich der NO _x -Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ_{Dummy})
Abbildung 23:	Optimierungsmaßnahmen vor dem Langzeitversuch: Nachrüstung einer Temperatur und Druckmessstelle im Feuerraum und Abdichten der undichten Stellen mit feuerfestem Keramikkleber
Abbildung 24:	CO-Emissionen der Langzeitmessung (12 Werktage mit jeweils 8 Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus 3 Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11 dar)
Abbildung 25:	Nicht-CH ₄ -OrgC Emissionen der Langzeitmessung (12 Werktage mit jeweils 8 Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus 3 Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11 dar)
Abbildung 26:	Gesamtstaubemissionen der Langzeitmessung (12 Werktage mit jeweils 8 Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus 3 Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11 dar)
Abbildung 27:	Vergleich der CO Emissionen von Dummy und Katalysator vor und nach dem Abdichten mit feuerfestem Keramikkleber
Abbildung 28:	Druckverluste über den Katalysator und Dummy während des Langzeitversuchs
Abbildung 29:	Grafische Darstellung der Messdaten des Monitoring von Kaminofen B (Messungen ohne Heizbetrieb)
Abbildung 30:	Vergleich des Abkühlvorgangs von Kaminofen A nach 8 Abbränden bei geöffneten und geschlossenen Zuluftklappen
Abbildung 31:	Lineare Regression der Wärmeverluste aller gemessenen Klappenstellungen zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Abgas während des Abkühlvorgangs Kaminöfen A
Abbildung 32:	Extrapolation der Summe der Stillstandsverluste bei kaltem Schornstein und während des Abkühlvorgangs nach dem Heizbetrieb in Abhängigkeit der Tage mit Heizbetrieb

Abbildung 33:	Amortisationszeit der Zuluft Klappe LKF der Firma Kutzner + Weber GmbH in Abhängigkeit der Tage mit Heizbetrieb pro Jahr. (Annahmen: Ofen dient als sekundäre Heizung; primär wird mit Öl Kessel geheizt; Ölpreis = 0,66 €/l; Jahresnutzungsgrad Öl Kessel = 75 %)
Abbildung 34:	Steuerungsparameter der TATAREK Steuerung in grafischer Darstellung [49]77
Abbildung 35:	Vergleich der gasförmigen Emissionen der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder mit dem Naturzugschornstein
Abbildung 36:	Direkter Vergleich der CO Emissionen und Abgastemperaturen des 4. Abbrands bei manuellem Betrieb mit dem 4. Abbrand bei Verwendung einer Ofensteuerung nach Optimierung der Steuerungsparameter (TATAREK 3)79
Abbildung 37:	Direkter Vergleich der OrgC Emissionen des 4. Abbrands bei manuellem Betrieb mit einem 4. Abbrand bei Verwendung einer Ofensteuerung nach Optimierung der Steuerungsparameter (TATAREK 3)
Abbildung 38:	Mittlere Abbranddauer der verschiedenen Steuerungen und Zugbegrenzer im Vergleich81
Abbildung 39:	Vergleich der partikelförmigen Emissionen (PM) der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder Naturzugschornstein82
Abbildung 40:	Vergleich der Wirkungsgrade und Verluste der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder Naturzugschornstein. (q_a thermische Verluste während dem Betrieb, q_b chemische Verluste der Verbrennung, q_{cool} Wärmeverluste nach dem Betrieb bzw. während der Abkühlphase, q_c Verluste durch unverbrannte Rückstände vgl. Abschnitt 4.1.6)
Abbildung 41:	Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anzahl an Tagen mit Heizbetrieb pro Jahr, berechnet am Beispiel der Schmid SMR Verbrennungsluftsteuerung85
Abbildung 42:	Gesiebte Rückstände nach 8 Abbränden bei manuellem Betrieb. Links: Partikel ≤ 3,15 mm, rechts; Partikel > 3,15 mm87
Abbildung 43:	Gesiebte Rückstände nach 8 Abbränden mit Steuerung Schmid SMR. Links: Partikel ≤ 3,15 mm, rechts; Partikel > 3,15 mm87
Abbildung 44:	Grafischer Vergleich der Berechnungsmethoden für die Verluste aus unvollständig verbrannten Rückständen. Die gestrichelte Linie bei 0,5 % zeigt den nach DIN EN 13240 pauschal abziehbaren Wert für naturbelassenes Holz
Abbildung 45:	Vergleich der CO Emissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [41])94

12

Abbildung 46:	Vergleich der OrgC-Emissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [41]).	95
Abbildung 47:	Vergleich der partikelförmigen Emissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [41]).	96
Abbildung 48:	Vergleich des Wirkungsgrades gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa	97
Abbildung 49:	Automatische Verbrennungsluftklappe für Pelletöfen und handbeschickte Holzfeuerungen	99
Abbildung 50:	Qualitativer Verlauf von Abgastemperatur und Stellung der automatischen Verbrennungsluftklappe (Doppelklappe)	100
Abbildung 51:	Prototyp, Verbrennungsluftklappe mit einstellbarem Schaltpunkt	102
Abbildung 52:	Ofensteuerung K + W Compact, Serienprodukt	103
Abbildung 53:	Schematischer Verlauf der Abgastemperatur und der Klappenstellung über einen Abbrand	104
Abbildung 54:	Verlauf der Abgastemperaturen verschiedener hintereinander folgender Abbrände ohne Verbrennungsluftsteuerung	106
Abbildung 55:	Verlauf des Restsauerstoffgehaltes verschiedener hintereinander folgender Abbrände ohne Verbrennungsluftsteuerung	107
Abbildung 56: /	Abbrandversuch mit LabVIEW-basierter Ofensteuerung, Ansteuerung der Zuluftklappe über PC mit USB-Modul	109
Abbildung 57:	Bedienoberfläche des LabVIEW-basierten Prototypen einer selbstadaptiven Ofensteuerung	110
Abbildung 58:	Vergleich der gasförmigen Emissionen (Kohlenstoffmonoxid und organischer Kohlenstoff) des Prototypen mit dem Stand der Technik und dem manuellen Betrieb, Ermittelt auf dem Prüfstand am TFZ	111
Abbildung 59:	Vergleich der partikelförmigen Emissionen (Gesamtstaub) des Prototypen mit dem Stand der Technik und dem manuellen Betrieb, ermittelt auf dem Prüfstand am TFZ	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anzahl der in 2016 festgestellten Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe nach Alter sortiert [46].	19
Tabelle 2:	Übergangsfristen für bestehende Einzelraumfeuerungsanlagen [4]	20
Tabelle 3:	Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrade für Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe (Anforderungen bei der Typprüfung)	21
Tabelle 4:	Technische Daten der verwendeten Kaminöfen	29
Tabelle 5:	Übersicht der untersuchten Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbegrenzer	34
Tabelle 6:	Ergebnisse des Vorversuchs zur Strömung durch und um die Schaumkeramik	47
Tabelle 7:	Ergebnisse des Spülversuchs mit den Schaumkeramik-Paaren nach Versuchsdurchführung	50
Tabelle 8:	Messzeiträume der untersuchten Kaminöfen bei der jeweiligen Luftklappeneinstellung	66
Tabelle 9:	Mittelwerte aus den Messdaten zu den kalten Stillstandverlusten sowie mittlere berechnete monatliche Verluste	67
Tabelle 10:	Ergebnisse der Messungen während des Abkühlvorgangs nach dem Ofenbetrieb bei geöffneter Luftklappe (letzte eingestellte Position) (Kaminofen A)	70
Tabelle 11:	Ergebnisse der Messungen während des Abkühlvorgangs nach dem Ofenbetrieb bei geschlossener Luftklappe (Kaminofen A)	71
Tabelle 12:	Vergleich der Wirkungsgrade und Verluste (jeweils in %) der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder am Naturzugschornstein	84
Tabelle 13:	Mittlere Ergebnisse der Elementaranalyse und der Heizwertberechnung nach GAUR et al. sowie der Heizwertbestimmung nach DIN EN ISO 18125	89
Tabelle 14:	Tabellarischer Vergleich der Asche und Holzkohlemengen nach den Versuchen sowie der Glühverluste und der eingesetzten Brennstoffmenge	91

1 Einleitung

Aktuell stellt die Holzverbrennung in Kleinfeuerungsanlagen die am meisten verbreitete Bioenergieanwendung in der Bundesrepublik Deutschland dar. Begünstigt durch EUweite (z.B. Finanzierung diverser Forschungsprojekte) und auch nationale Maßnahmen (z. B. KFW, BAFA und 10.000 Häuser Programm) zur Förderung von Biomasse zur Energiebereitstellung ist die erwartete EU-weite Zunahme der häuslichen Biomassefeuerungen erheblich. Kaminöfen weisen dabei den größten und auch kontinuierlich ansteigenden Anteil bezüglich der installierten Einzelanlagen in Europa auf. Nach Marktanalysen, die im EU FP7 Projekt EU-UltraLowDust durchgeführt wurden (Projekt Nr. 268189), liegt das Potential an jährlich zusätzlich installierten Öfen (Scheitholz und Pellet) bei rund 2.200.000 Einheiten/Jahr [2].

Dieses zusätzliche Potential an erneuerbarer Energie kann zwar maßgeblich zur Senkung der Treibhausgasemissionen in der EU beitragen, allerdings ist auch bekannt, dass v. a. Scheitholzöfen die höchsten Emissionen an Kohlenstoffmonoxid (CO), organischem Kohlenstoff (Org.-C) und Feinstaub aller häuslichen Biomassefeuerungen erzeugen. Bereits in dem ERA-NET Projekt "FutureBioTec" (4th joint call in 2009 on clean biomass combustion) konnte gezeigt werden, dass mit der Anwendung fortschrittlicherer Verbrennungskonzepte und moderner Simulationstools (CFD – computational fluid dynamics) eine signifikante Minderung der Emissionen verglichen mit Öfen nach Stand der Technik möglich ist (60 % für CO, 85 % für Org.-C und 55 % für Gesamtstaub) [28]. Das ERA-NET Projekt "Wood Stoves 2020" knüpft direkt an die Ergebnisse auf dem Projekt FutureBioTec an und zielt auf die Entwicklung innovativer Maßnahmen und Technologien ab um die Emissionen von Kaminöfen weiter zu reduzieren sowie den Wirkungsgrad zu steigern und das Anwendungsgebiet von der ausschließlichen Einzelraumfeuerstätte zur Zentralheizung auszuweiten. Letzteres könnte vor allem für zukünftige Anwendungen in Niedrigenergiehäusern relevant sein.

15

2 Stand der Technik

2.1 **Typischer Aufbau eines modernen Kaminofens**

Moderne Kaminöfen für die Verbrennung von Scheitholz haben meist einen ähnlichen Aufbau. Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung eines modernen Kaminofens anhand derer die Funktion und die typischen Bauteile erläutert werden soll. Die Verbrennung findet in der Hauptbrennkammer (5) statt. Der Brennstoff wird manuell durch den Nutzer nachgelegt.



Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Kaminofens nach Stand der Technik (Quelle TFZ)

Moderne Kaminöfen verfügen i. d. R. über einen zentralen Verbrennungsluftstutzen (1) zum Anschluss an eine externe Verbrennungsluftversorgung. Diese wird bei modernen Gebäuden mit dichter Gebäudehülle zwingend benötigt, da es bei Abzug der Luft aus dem Wohninnenraum zu Sauerstoffmangel im Wohnraum oder zu Rückbrand bei Unterdruck z.B. durch Dunstabzugshauben kommen kann. Gleichzeitig verringert die externe Verbrennungsluftversorgung die Wärmeverluste, da keine warme Luft aus dem Aufstellraum entnommen wird. Außerdem ist der Verbrennungsluftstutzen erforderlich, wenn eine nachrüstbare Verbrennungsluftsteuerung angeschlossen werden soll. Die Verbrennungsluft, die in den Kaminofen strömt (blaue Pfeile in Abbildung 1) teilt sich auf in die Primärluft (2), die durch den Rost in die Hauptbrennkammer (5) strömt, und in die Sekundär-, bzw. Scheibenspülluft (3), die an der Scheibe der Ofentür entlanggeleitet wird. Letztere Luftzufuhr "spült" die Scheibe und verhindert damit die Anlagerung unverbrannter Verbrennungsrückstände wie Teer, Ruß oder Partikelablagerungen an der Scheibe. Die Scheibenspülluft dient gleichzeitig als Verbrennungsluft. Ein Teil gelangt i. d. R. an das Glutbett und dient dort als Primärluft, wenn z. B. der Rost geschlossen ist (z. B. durch eine Drehrosette), wenn die Rostluftklappe geschlossen wird oder wenn gar kein Rost vorhanden ist. Der Rest der Scheibenspülluft wird oberhalb des Glutbetts in die Hauptbrennkammer (5) gelenkt und versorgt die dortige Verbrennung des Holzgases mit weiterem Sauerstoff (als Sekundärluft).

Einige moderne Öfen sind mit einem zusätzlichen Sekundärlufteinlass (4) (Düsen oder Schlitze) auf der Rückseite der Hauptbrennkammer ausgestattet, diese Luftzufuhr wird teilweise als "Tertiärluft" bezeichnet. Ein solcher Lufteinlass erhöht die Turbulenz in der Brennkammer und verbessert die Durchmischung der brennbaren Gase aus der Pyrolyse des festen Brennstoffs mit Sauerstoff. Der Anteil dieses Luftstroms ist normalerweise kleiner als der Anteil der Scheibenspülluft.

Die Wärme, die in der Hauptbrennkammer erzeugt wird, wird durch eine feuerbeständige, mineralische Isolierschicht aus Feuerfestbeton, Schamotte oder Vermiculit möglichst hoch gehalten. Dies garantiert hohe Temperaturen für einen vollständigen Ausbrand.

In der Nachbrennkammer (7) wird die Verbrennung abgeschlossen. Hierfür wird die Temperatur durch die feuerfeste Auskleidung weiterhin hoch gehalten (Feuerfestbeton, Schamotte, Vermiculit). Außerdem werden die heißen Gase über eine Umlenkplatte (6) in den schmalen Eingang zur Nachbrennkammer geleitet, wodurch Turbulenzen erzeugt werden, die eine bessere Durchmischung der Brenngase mit dem verbliebenen Sauerstoffe bewirken. Unter optimalen Bedingungen findet hier der vollständige Ausbrand der brennbaren Gase statt, bevor die Abgase über den Abgasstutzen (8) in das Verbindungsstück zum Schornstein geleitet werden.

Im oberen Bereich des Kaminofens (Wärmetauscher) erwärmen die heißen Abgase die mit Gusseisen, Stahl oder mineralischen Materialien verkleidete Oberfläche des Ofens. Dies ermöglicht die Wärmeabgabe an den Wohnraum. Ein oft noch größerer Anteil der nutzbaren Wärme wird über die Oberfläche der Scheibe in der Ofentür abgegeben. Ein weiterer Anteil der nutzbaren Wärme wird entweder durch freie Wärmekonvektion an den Ofenoberflächen oder in dafür konzipierten Konvektionskanälen abgegeben.

2.2 Anzahl an Einzelraumfeuerungen in der Bundesrepublik Deutschland

Aktuell wird in der Bundesrepublik Deutschland von ca. 11,7 Mio. Einzelraumfeuerungen ausgegangen [46]. Hierunter fallen größtenteils Kaminöfen. Tabelle 1 zeigt die Anzahl der in 2016 durch den Bundesverband des Schornsteinfeger-Handwerks festgestellte Anzahl der Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland nach dem Alter auf dem Typen-

schild sortiert. Aus diesen Zahlen sowie den in der 1. BImSchV festgelegten Fristen (Tabelle 2) geht hervor, dass bereits bis Ende 2017 rund 3 Mio. Anlagen ausgetauscht, nachgerüstet oder nachgemessen werden müssen bzw. mussten. Dies entspricht ca. 26 % der derzeit installierten Anlagen. Bis 2020 müssen weitere 1,4 Mio. bzw. 12,3 % und bis 2024 weitere 4,9 Mio. bzw. 41,5 % der installierten Anlagen ausgetauscht oder nachgerüstet werden.

Wie bereits erwähnt bleiben dem Betreiber der Anlage nach Ablauf der in Tabelle 2 angegebenen Übergangsfristen 3 Möglichkeiten:

- Austausch der Einzelraumfeuerung gegen neue Anlage, die den Stufe 2. Grenzwert der 1. BlmSchV einhält. Der Nachweis erfolgt durch Angabe der Werte aus der Typenprüfung auf dem Typenschild der Einzelraumfeuerung.
- Weist der Betreiber durch eine Messung unter entsprechender Anwendung der Anlage 4 Nummer 3 der 1. BlmSchV [4] durch eine/n Schornsteinfeger/in nach, dass der Grenzwert der 1. BlmSchV f
 ür Anlagen die vor dem 22. M
 ärz 2010 errichtet wurden (Gesamtstaub (0,15 g/Nm³) und CO (4 g/Nm³)) eingehalten wird, oder er sorgt daf
 ür, dass durch Nachr
 üstung einer Einrichtung zur Reduzierung der Staubemissionen nach dem Stand der Technik der Grenzwert eingehalten wird.
- Die Anlage wird nach Ablauf der Übergangsfrist außer Betrieb genommen.

Baujahr /	Anzahl	gerundet	relativer
Datum auf dem Typschild der Anlage	Anzani	gerundet	Anteil (%)
vor 1.1.1950	200.433	200.000	1,7
1950 bis 1974 / nicht feststellbar	2.107.816	2.110.000	18,0
1975 bis 1984	729.604	730.000	6,2
1985 bis 1994	1.439.837	1.440.000	12,3
1995 bis 21.3.2010	4.854.837	4.850.000	41,5
ab 22.3.2010	2.353.086	2.350.000	20,1
Gesamt	11.685.613	11.680.000	100,0

Tabelle 1:	Anzahl der in 2016 festgestellten Einzelraumfeuerungsanlagen für feste
	Brennstoffe nach Alter sortiert [46].

Datum auf dem Typschild	Zeitpunkt der Nachrüstung oder Außerbetriebnahme
bis einschließlich 31. Dezember 1974 oder Datum nicht mehr feststellbar	31. Dezember 2014
1. Januar 1975 bis 31. Dezember 1984	31. Dezember 2017
1. Januar 1985 bis 31. Dezember 1994	31. Dezember 2020
1. Januar 1995 bis einschließlich 21. März 2010	31. Dezember 2024

T-L-H- 0	l ll survey a sector de la construction de la construction de la construction de la construction de la constru	47
	- 1 increasing the test is the posterior of the test interval interval in the test in the test is the test is the test in the test is	
		ėI.,
		_

Für Kaminöfen ist aufgrund der im Vergleich zu z.B. Kachelöfen eher geringen Anschaffungskosten i. d. R. mit einem Austausch der Anlage gegen eine neue als mit der Nachrüstung von staubmindernden Maßnahmen (z.B. Partikelabscheider Fa. K+W, Airjekt 1 ca. 1.462 €) zu rechnen. Bei bis 2024 insgesamt ca. 5,3 Mio. Anlagen bzw. ca. 53,8 % der derzeit installierten Anlagen besteht hier ein sehr großes Emissionsminderungspotential. Das gilt allerdings nur wenn die alten Anlagen auch gegen emissionsarme Neuanlagen getauscht werden.

2.3 **Rechtlicher Hintergrund**

Die Zulassung und Nutzung von Kaminöfen ist in der Bundesrepublik Deutschland über die 1. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetztes (1. Blm-SchV) geregelt. Seit dem 31.12.2014 müssen neu installierte Einzelraumfeuerungen den Stufe 2 Grenzwert der 1. BlmSchV einhalten (Tabelle 3). Für Kaminöfen bzw. Raumheizer ist dieser 1,25 g/Nm³ für CO und 0,04 g/Nm³ für Staub.

21

Tabelle 3:	Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrade für Einzelraumfeue-
	rungsanlagen für feste Brennstoffe (Anforderungen bei der Typprüfung)

Feuerstättenart	Technische Regeln	Stufe 1: Errichtung ab dem 22.03.2010		Stufe 2: Errichtung nach dem 31.12.2014		Errichtung nach Inkrafttreten dieser Verord- nung
		СО	Staub	СО	Staub	η _{min}
		[g/m³]	[g/m³]	[g/m³]	[g/m³]	[%]
Raumheizer mit Flachfeuerung	DIN EN 13240	2,0	0,075	1,25	0,04	73
Raumheizer mit Füllfeuerung	DIN EN 13240 Dauerbrand	2,5	0,075	1,25	0,04	70
Speichereinzel- feuerstätten	DIN EN 15250/A1	2,0	0,075	1,25	0,04	75
Kamineinsätze (geschlossene Betriebsweise)	DIN EN 13229	2,0	0,075	1,25	0,04	75
Kachelofenein- sätze mit Flach- feuerung	DIN EN 13229/A1	2,0	0,075	1,25	0,04	80
Kachelofenein- sätze mit Füll- feuerung	DIN EN 13229/A1	2,5	0,075	1,25	0,04	80
Herde	DIN EN 12815	3,0	0,075	1,5	0,04	70
Heizungsherde	DIN EN 12815	3,5	0,075	1,50	0,04	75
Pelletöfen ohne Wassertasche	DIN EN 14785	0,40	0,05	0,25	0,03	85
Pelletöfen mit Wassertasche	DIN EN 14785	0,40	0,03	0,25	0,02	90

Der Nachweis über die Einhaltung der Grenzwerte erfolgt durch eine sogenannte Typenprüfung nach DIN EN 13240 [12] (Kaminöfen). Da es zum Erscheinungszeitpunkt dieser Norm noch keine Grenzwerte für Staubemissionen aus Einzelraumfeuerungen gab ist die Staubmessung derzeit noch in der zusätzlichen Norm DIN CEN/TS 15883 [13] geregelt. In Zukunft sollen die allgemeinen Anforderungen an die Prüfverfahren zur Typenprüfung aller Einzelraumfeuerstätten inklusive der Beschreibung des anzuwendenden Staubmessverfahrens in der derzeit erarbeiteten DIN EN 16510-1 [14] und den zusätzlichen Teilen zu den jeweiligen Feuerstättenarten geregelt sein:

- Teil 2-1: Raumheizer
- Teil 2-2: Kamineinsätze einschließlich offene Kamine
- Teil 2-3: Herde
- Teil 2-4: Heizkessel für feste Brennstoffe mit einer Nennwärmeleistung bis 50 kW
- Teil 2-5: Speicherfeuerstätten
- Teil 2-6: Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets

Die derzeit für Kaminöfen gültige DIN EN 13240 sowie DIN CEN/TS 15883 bietet nach Recherchen, die in dem Projekt EU-beReal durchgeführt wurden, deutlichen Interpretationsspielraum darüber, wie die Emissionsmessungen und Auswertungen durchzuführen sind. So wird beispielsweise die Messung der partikelförmigen Emissionen in Deutschland auf Typenprüfständen häufig mit dem Wöhler SM 96 Partikelmessgerät durchgeführt, welches in Messungen an Kaminöfen im Rahmen des EU-beReal Projektes deutliche Abweichungen von minus 10 bis minus 33 % zum angewendeten Referenzverfahren nach VDI 2066 aufzeigte. Des Weiteren beginnt laut DIN CEN/TS 15883 die Staubmessung erst 3 min nachdem die Brennstoffauflage erfolgt ist und läuft ab diesem Zeitpunkt für 30 min, unabhängig von der Abbranddauer. Aus Online-Staubmessungen ist aber bekannt, dass insbesondere zu Beginn des Abbrands ein Großteil der Staubemissionen entsteht [36], dieser wird hier aber nicht erfasst.

Auch die Messung der gasförmigen Emissionen nach DIN EN 13240 bietet Interpretationsspielraum. So beginnt z.B. die Messung der gasförmigen Emissionen "unmittelbar nach dem Befüllen der Feuerstätte" [12]. Die mittleren CO Emissionen, der Wirkungsgrad und die Nennwärmeleistung sind aus mindestens zwei gültigen Prüfungen (Abbränden) bei Nennwärmeleistung zu berechnen. Dabei ist weder festgelegt, ob diese Aufeinanderfolgend seien müssen, noch ob es dieselben Abbrände für die Berechnung des Wirkungsgrades und der CO Emissionen seinen müssen. Das Anzünden und Aufheizen des Kaminofens wird bei der Typenprüfung nicht mitgemessen. Auch hierin sind – neben den Benutzer- und Brennstoffeinflüssen – die Hauptgründe dafür zu suchen, dass die Emissionen in Realmessungen meist deutlich höher sind als in der Typenprüfung.

2.4 Einflüsse auf das Emissionsverhalten von Kaminöfen

Moderne Scheitholzkaminöfen halten bei Messungen in Typenprüfung die Emissionsgrenzwerte von 1,25 g/Nm³ für CO und 0,04 g/Nm³ für Staub (jeweils bei 13 % Bezugssauerstoff) sowie einen Mindestwirkungsgrad von 73 % ein. In vorausgehenden bzw. parallel laufenden Projekten (EU-Projekt "beReal" und "BMU-Feinstaub" [31; 41; 44; 52]) konnte aufgezeigt werden, dass bedingt durch das Betreiberverhalten (z. B. Lufteinstellungen, zu hohe Brennraumbeladung, falsches Anzünden), sowie die örtlichen Gegebenheiten (z. B. Schornsteinzug) und Brennstoffqualität (zu feuchtes Holz oder ungeeignete Aufbereitungsform, z. B. Rundlinge), die Emissionen von Scheitholzkaminöfen in der Praxis die Werte der Typenprüfungen sowie der Grenzwerten der 1. BlmSchV deutlich übersteigen können. Auch die Wirkungsgrade lagen bei praxisnahen Messungen teilweise deutlich unter den geforderten 73 %. Als Folge wurden neuartige Prüfmethoden für die Messung realer Emissionen an Kaminöfen (EU-Projekt "beReal" mit Anzündphase sowie Nenn- und Teillastbetrieb [42] [44]) sowie zahlreiche Beratungsunterlagen für den richtigen Betrieb eines Kaminofens und für den richtigen Umgang mit dem Brennstoff (Lagerung, Scheitholzgröße, etc.) erstellt [32]. Um mögliche Fehlbedienungen des jeweiligen Ofens seitens des Benutzers zu minimieren, wird die Erstellung eines nach Vorgaben einheitlich gestalteten "Quick User Guides", der für jeden Ofentyp speziell erstellt werden muss, empfohlen [42].

Weiteres Optimierungspotenzial liegt in primär- und sekundärseitigen technischen Verbesserungen der Anlagen selbst. Bereits im ERA-NET-Projekt "FutureBioTec" konnte gezeigt werden, dass mit der Anwendung fortschrittlicherer Verbrennungskonzepte und moderner Simulationstools (CFD) eine signifikante Minderung der Emissionen verglichen mit Öfen nach dem damaligen Stand der Technik möglich ist. Die im Projekt erzielte Emissionsminderung betrug dabei 60 % für CO, 85 % für Org.-C und 55 % für Staub [28].

Tendenziell wirkt eine Erhöhung des Wirkungsgrades auch senkend auf den Ausstoß von Schadstoffen hin, da zur Bereitstellung derselben Wärmemenge weniger Brennstoff eingesetzt und damit weniger Emissionen freigesetzt werden. Dies gilt allerdings nur dann, wenn die Konzentration der Schadstoffe im Abgas maximal gleich bleibt.

Technische Optimierungsmöglichkeiten von Kaminöfen sind vielfältig und umfassen u. a. den Einsatz (bzw. die Nachrüstung) mit Katalysatoren, Filtern oder die generelle Verbrennungsoptimierung durch Luftführung und Brennraumgeometrie. Außerdem kommen vermehrt elektronische Steuerungen und Regelungen z.B. zur automatischen Einstellung der Verbrennungsluft zum Einsatz. Die Begriffe Steuerungen und Regelungen werden oft verwechselt, sie werden daher nachfolgend kurz erläutert.

Gemäß DIN IEC 60050-351 [15] ist die Steuerung ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen (openloop control). Kennzeichen für das "Steuern" ist der offene Wirkungsweg oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken" (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Wirkungsplan eines Systems mit offenem Wirkungsweg (Steuerkette)

Im Gegensatz dazu handelt es sich bei einer Regelung um einen Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (die zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird (closed-loop control) [15]. Kennzeichen für das "Regeln" ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst" (siehe Abbildung 3)



Abbildung 3: Wirkungsplan eines Systems mit geschlossenem Wirkungsweg (Regelkreis)

Beispielsweise wäre ein Ofenbetrieb, bei dem der Abbrandzustand auf Basis der Abgastemperatur erfasst wird, um eine dazu passende vordefinierte Luftklappenstellung herbeizuführen, ein gesteuerter Betrieb. Wäre jedoch der Ofen mit einer Lambdasonde oder mit einer CO/O₂.Sonde ausgestattet, mit der z.B. in der Hauptabbrandphase die Einhaltung eines Sollwertes überprüft und durch Klappenstellung nachjustiert werden könnte, handelte es sich um eine Regelung.

Bei den im vorliegenden Projekt untersuchten nachrüstbaren Ofensteuerungen handelt es sich per Definition um Steuerungen. Viele dieser neu entwickelten technischen Maßnahmen sind noch im Versuchsstadium oder erst kurzfristig auf dem Markt erhältlich. Folglich sind sie bezüglich ihrer tatsächlichen Wirkung auf das Emissionsverhalten, den Wirkungsgrad der Anlagen und bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit und ihres Dauereinsatzes noch nicht abschließend bewertet.

3 Zielsetzung und Aufbau des Projektes

Ziel des Projekts "Wood Stoves 2020" war es, geeignete Konzepte, Technologien und Maßnahmen zu identifizieren, um eine Reduzierung der Emissionen von Scheitholz-Kaminöfen um 50 bis 80 % und eine Steigerung des Wirkungsgrades auf über 90 % zu ermöglichen. Unter der Annahme, dass in Zukunft alle neu installierten Kaminöfen in Europa mit diesen neuen Technologien ausgerüstet sind, könnte der Ausstoß an Staubemissionen somit um 60 bis 90 % gesenkt werden (geringere Emissionen, geringerer Brennstoffeinsatz).

Abbildung 4 gibt einen Überblick aller untersuchten Maßnahmen, Technologien und Ansatzpunkte, mit denen die Ziele des Projekts durch das gesamte Konsortium erreicht werden sollten. Diese sollen nachfolgend kurz erläutert werden. Jedoch werden Arbeiten und Ergebnisse, die vornehmlich außerhalb der Projektschwerpunkte des TFZ stattfanden, nicht in diesem Bericht sondern in separaten Guidelines und Berichten der Verbundprojektpartner wiedergegeben. Bei deren Erarbeitung war das TFZ als Projektkoordinator i. d. R. maßgeblich mit beteiligt. Entsprechende Verweise sind der nachfolgenden Kurzdarstellung beigefügt. Sie finden sich außerdem im Anhang.



Abbildung 4: Maßnahmen bzw. Ansatzpunkte die im Rahmen des Projekts "Wood Stove 2020" untersucht bzw. entwickelt wurden.

Auswahl und Bewertung geeigneter Abgassensoren: Um geeignete Sensoren für automatische Verbrennungsluftsteuerungen zu identifizieren wurde zu Projektbeginn ein Sensorscreening durchgeführt. Anschließend wurden mehrere Lambdasonden (Sprungsonden und Breitbandsonden) sowie ein CO/O₂-Kombi-Sensor in einem Lang-

26

zeitversuch unter Realbedingungen getestet. Die Arbeiten erfolgten über die Projektpartner RISE (Research Institutes of Sweden AB) und BIOS (BIOENERGIESYSTEME GmbH). Nähere Informationen können dem gesonderten <u>Bericht</u> entnommen werden [47].

Sensor-basierte integrierte Verbrennungsluftsteuerungen. Ziel einer integrierten Verbrennungsluftsteuerung ist es, die Verbrennungsluftmassenströme während eines Abbrandes immer optimal einzustellen. Hierdurch können vor allem die gasförmigen Emissionen (CO und Org.-C) unter Umständen aber auch die Emissionen an unverbrannten Partikeln (z. B. Ruß) gesenkt werden. Die Arbeiten wurden durch die Projektpartner RISE & Nibe AB sowie BIOS & RIKA (Innovative Ofentechnik GmbH) durchgeführt. Genauere Informationen rund um das Thema Ofensteuerungen können den dazu erstellten <u>Guidelines</u> [34] entnommen werden. Das TFZ war an der Erstellung der Guidelines als Projektkoordinator maßgeblich beteiligt. Innerhalb des Projekts wurden zwei neue integrierte Steuerungskonzepte entwickelt, eines basierend auf der Feuerraumtemperatur und ein weiteres basierend auf Feuerraumtemperatur und Restsauerstoffgehalt im Abgas (siehe auch <u>Final Report</u> [43]).

CFD-gestützte Optimierung. Die CFD-Simulation stellt eine sehr gute Möglichkeit dar um Optimierungen an Feuerraumgeometrie (Temperatur, Durchmischung), Luftführung (Luftstufung, Durchmischung) sowie Auslegung von Wärmetauschern und Isolierungen (Temperaturen, Wirkungsgrad) schon vor dem Bau eines Prototyps möglichst optimal vorauszuberechnen und somit eine möglichst vollständige Verbrennung bei hohem Wirkungsgrad zu erreichen. Sie ist damit dem bisher noch weit verbreiteten "Trial and Error"-Verfahren, d. h. der schrittweise Optimierung von Öfen an Praxisanlagen, vorzuziehen. Die CFD-gestützte Optimierung wurde maßgeblich durch den Projektpartner BIOS durchgeführt. Einzelheiten hierzu finden sich in den erstellten <u>Guidelines</u> für optimierte Ofenkonzepte [35].

Wirkungsgradsteigerung und Wärmetauscher mittels PCM. Um Wirkungsgrade über 90 % zu realisieren ist es neben einer möglichst vollständigen Verbrennung bei niedrigem Restsauerstoffgehalt im Abgas notwendig, die Abgastemperatur möglichst niedrig zu halten. Es soll demnach möglichst wenig Wärme über das Abgas verloren gehen. Diese wird bei modernen Kaminöfen nach Stand der Technik meist durch Abstrahlung an den Wohnraum (Feuerraumtüre und Flächen) sowie durch Konvektion an den Außenseiten des Ofens abgegeben. Eine zweite Möglichkeit, die Abgastemperatur zu senken besteht darin, die überschüssige Wärme über einen Abgaswärmetauscher auf ein festes oder flüssiges Medium zu übertragen. Der bisher gängige Fall wäre ein Kaminofen mit Wassertasche, der einen Anschluss an das Heizungsnetz benötigt. Im Rahmen des Projekts "Wood Stove 2020" wurde ein neuartiger Wärmetauscher über den Projektpartner BIOS entwickelt. Bei diesem wurde ein so genanntes Phasenwechselmaterial (PCM) eingesetzt, d. h. ein Salz, welches bei den Abgastemperaturen des Ofens von der festen in die flüssige Phase wechselt und nach dem Ofenbetrieb während der Wärmeabgabe wieder fest wird und damit die Kristallisationsenergie nutzt. Mit dem neu entwickelten Wärmetauscher ist es möglich ca. 50 % der produzierten Wärme eines 10 kW Kaminofens zu speichern und dann über Nacht abzugeben. Das bedeutet, dass im Nennlastbetrieb ca. 5 kW in dem Wärmespeicher und der Speichermasse des Ofens gespeichert werden und 5 kW an den Raum abgegeben werden. Dies macht Kaminöfen auch wieder interessanter für den Einsatz in Niedrigenergiehäusern und erhöht den Nutzerkomfort (siehe auch <u>Guidelines</u> [33] zu PCM und <u>Final Report [43]</u>).

Integrierte Medium- oder Hochtemperaturkatalysatoren. Ein weiteres großes Arbeitspaket des Gesamtprojekts beschäftigte sich mit der Auswahl und der Bewertung geeigneter Medium- und Hochtemperaturkatalysatoren, sowie dem Einsatz von Schaumkeramikfiltern. Innerhalb des Projekts wurden mehrere Medium- und Hochtemperaturkatalysatoren unterschiedlicher Bauart (Trägermaterial) und Beschichtungen (Wachboot und Mischung der Edelmetalle), sowie ein Schaumkeramikfilter und ein Nachrüstbare Katalysatoren getestet. Die Arbeiten fanden u. a. am TFZ statt und werden in diesem Bericht wiedergegeben (siehe Abschnitt 4.2). Des Weiteren wurden geeignete Positionen in Kaminöfen zur Implementierung solcher Katalysatoren in Öfen hinsichtlich der Temperaturen und Druckverluste untersucht. Die Ergebnisse sind in einem gesonderten Bericht [8] zusammengefasst und auch in den Guidelines für optimierte Ofenkonzepte [35] zu finden (siehe auch Final Report [43]).

Rauchsauger. Auch die Auswirkungen eines zu geringen Schornsteinzugs, vor allem beim Anzünden von Kaminöfen, wurden untersucht. Dies kann durch Einsatz eines Rauchsaugers vermieden werden. Neben einem zu geringen Schornsteinzug kann es durch den Einsatz von Filtern, Katalysatoren oder neuen Ofentechnologien (z. B. viele Umlenkungen) zu höheren Druckverlusten kommen, die den Einsatz eines Rauchsaugers nötig machen. Zu diesem Zweck wurde eine Checkliste mit den wichtigsten Punkten, die beim Einsatz eines Rauchsaugers zu beachten sind, im Rahmen des Projekts erstellt und im Rahmen des <u>Final Report [</u>43] veröffentlicht. Hierfür war der Projektpartner RISE maßgeblich verantwortlich.

Stillstandsverluste (und unverbrannte Rückstände). Eine weitere Möglichkeit, den Nutzungsgrad von Kaminöfen zu steigern, ist es, die sogenannten Stillstandsverluste zu vermeiden. Diese bestehen zum einen aus den Verlusten an Wärme beim Entweichen der warmen Raumluft durch den nicht betriebenen Kaminofen über den kalten Schornstein, zum anderen aus den Wärmeverlusten nach dem Ofenbetrieb während des Abkühlvorgangs. Ein wesentlicher TFZ-Arbeitsschwerpunkt des Projekts "Wood Stove 2020" war es, diese Verluste erstmals zu quantifizieren und mögliche Konzepte zur Vermeidung dieser Verluste (automatische Klappen, nachrüstbare Ofensteuerungen) zu untersuchen und zu bewerten. Die Ergebnisse sind detailliert in Abschnitt 4.3, sowie im <u>Final Report [</u>43] und in einer Veröffentlichung im Rahmen der EUBC&E 2016 [39] dargestellt. Außerdem wurden die Verbrennungsrückstände durch das TFZ untersucht und hinsichtlich ihres Gehalts an Unverbranntem und dessen Energiegehalt bewertet (siehe Abschnitt 4.5).

Nachrüstbare Ofensteuerungen und Zugbegrenzer. Zusätzlich zu der Möglichkeit, neue Kaminöfen mit automatischen Verbrennungsluftsteuerungen auszustatten, besteht auch die Möglichkeit, solche Steuerungen in einfacherer Form (ohne Unterteilung der Luftströme) bei bestehenden Öfen nachzurüsten. Die Wirkung solcher nachrüstbaren

Steuerungen hinsichtlich der Emissionen und des Wirkungsgrades wurde anhand von drei auf dem Markt verfügbaren Modellen durch das TFZ getestet und bewertet. Außerdem wurde von dem Projektpartner Kutzner + Weber ein Prototyp einer "sich selbst an den Ofen adaptierenden" nachrüstbaren Ofensteuerung entwickelt und am TFZ getestet. Des Weiteren wurde der Einfluss eines zu hohen Schornsteinzugs auf die Emissionen und den Wirkungsgrad von Kaminöfen untersucht und ein mechanischer sowie ein elektronischer Zugbegrenzer getestet und bewertet. Die genannten Arbeiten sind in Abschnitt 4.4 dieses Berichts wiedergegeben. Allgemeine Hinweise zu Entwicklung und Betrieb von nachrüstbaren Ofensteuerungen können den <u>Guidelines über automatische</u> <u>Ofensteuerungen</u> [34] entnommen werden.

In den folgenden Kapiteln wird auf die Aufgabenschwerpunkte des am Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) bearbeiteten "Teilvorhaben 1" (siehe Kapitel 4) sowie des bei der Firma Kutzner + Weber GmbH bearbeiteten "Teilvorhaben 2" (siehe Kapitel 5) eingegangen.

Teilvorhaben 1 (TFZ):

- Bewertung des Langzeitverhaltens von Schaumkeramikfiltern in Kaminöfen und deren Ersatz durch Katalysatoren (Abschnitt 4.2).
- Quantifizierung von Stillstandsverlusten über den Schornstein sowie Bewertung von Minderungsmaßnahmen an Öfen (Abschnitt 4.3).
- Test und Bewertung mehrerer nachrüstbarer Ofensteuerungen hinsichtlich ihrer Wirkung auf Emissionen und Wirkungsgrad von Kaminöfen (Abschnitt 4.4).
- Untersuchung der unverbrannten Rückstände aus Kaminöfen hinsichtlich ihres Energieinhaltes (Abschnitt 4.5).
- Erarbeiten einer abgestimmten Prüfmethode für optimierte Ofenkonzepte und Bauteile zur Optimierung von Öfen (Abschnitt 4.1.6).

Teilvorhaben 2 (K+W)

- Entwicklung eines neuen Steuerungskonzeptes f
 ür die nachr
 üstbare Ofenregelung K+W Compact (Abschnitt 5.2).
- Entwicklung nachrüstbarer automatischer Verbrennungsluftklappen zur Vermeidung von Stillstandsverlusten (Abschnitt 5.1).
- Unterstützung bei der technischen Realisierung von Prüfstandsaufbauten am TFZ und Bereitstellung der zu testenden Geräte bzw. Bauteile.

4 Teilvorhaben 1: Aufgabenschwerpunkte am TFZ

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Aufgabenschwerpunkten des Projekts "Wood Stove 2020", die am Technologie und Förderzentrum untersucht wurden. Die Aufgabenschwerpunkte der Firma Kutzner + Weber GmbH sind unter Kapitel 5 ausgeführt. Eine Zusammenfassung der gesamten Projektergebnisse aller internationalen Projektpartner findet sich im <u>Final Report [43]</u>.

4.1 Material und Methoden

4.1.1 Beschreibung der verwendeten Feuerungen

Bei der für alle Feuerungsversuche (Abschnitt 4.2 bis 4.6) eingesetzten Einzelraumfeuerung (Kaminofen A) handelt es sich um einen Kaminofen nach aktuellem Stand der Technik mit einer Nennwärmeleistung von 8 kW. Der Kaminofen verfügt über einen zentralen Verbrennungsluftstutzen zum Anschluss an eine externe Verbrennungsluftzufuhr. Der Ofen wird werksseitig mit einem zweigeteilten, nicht katalytisch beschichteten Schaumkeramikfilter geliefert. Die Verbrennungsluft kann über zwei Drehregler separat als Primärluft durch den Rost und als Sekundärluft (Scheibenspülluft und Eindüsung an der Rückwand des Brennraums) geregelt werden. Außerdem verfügt der Ofen über einen Bypass zum Umgehen der eingebauten Schaumkeramikfilter, z. B. während des Anzündvorgangs bei zu geringem Schornsteinzug. Dieser Bypass war während der kompletten Versuchsdurchführung geschlossen um auch etwaige Einflüsse während des Anzündabbrands zu untersuchen.

Zur Bestimmung der Stillstandsverluste im kalten Zustand (siehe Abschnitt 4.3) wurden zwei weitere Kaminöfen (B und C) mit ebenfalls 8 kW Nennwärmeleistung eingesetzt. Tabelle 4 zeigt die wichtigsten technischen Daten der verwendeten Kaminöfen im Vergleich.

Bezeichnung	Nennwärmeleistung [kW]	Baujahr	Masse [kg]	Externer Verbren- nungsluftanschluss
Kaminofen A	8	2013	224	Ja
Kaminofen B	8	2013	220	Ja
Kaminofen C	8	2009	192	Ja

	Tabelle 4:	Technische	Daten der	verwendeten	Kaminöfen
--	------------	------------	-----------	-------------	-----------

4.1.2 Prüfstandsaufbau und Messtechnik

Alle Messungen wurden am Feuerungsprüfstand des TFZ in Straubing durchgeführt. Abbildung 5 zeigt den Prüfstandsaufbau. Dieser wurde auch bei allen weiteren Messungen, die mit geregeltem Schornsteinzug durchgeführt wurden, verwendet (siehe Abschnitt 4.2 & 4.4). Der Aufbau der Messstrecke und die Anordnung der Messstellen erfolgte in Anlehnung an die gültige Norm zur Typenprüfung von Kaminöfen DIN EN 13240 [12].



Abbildung 5: Prüfstandsaufbau und Anordnung der Messstellen für die Kaminofenmessungen mit geregeltem Zug (links) und mit Naturzugschornstein (rechts)

Die gravimetrische Staubmessung erfolgte mittels Staubsonden (Firma Paul Gothe GmbH) mit einer Kombination aus gestopfter Filterhülse und nachgeschaltetem Planfilter in Anlehnung an die Richtlinie VDI 2066-1 [51] . Abweichend von der Richtlinie wurden sowohl die Filtrations- als auch die Filter-Vor- und -Nachbehandlungstemperatur auf 180 C erhöht, um die Staubemissionen und die Org.-C Emissionen bei einer einheitlichen Temperatur zu erfassen (siehe auch Abschnitt 4.1.6). Die Emissionen an Org.-C wurden mittels eines Flammenionisationsdetektors (FID) (Mess- & Analysentechnik GmbH ThermoFID) gemessen. Die Messung der gasförmigen Komponenten O₂, CO₂, und CO erfolgte mittels Einzelkomponenten-Gasanalysatoren (nicht-dispersive IR-Spektroskopie) (ABB Automation GmbH ABB AO2020), NO_x mittels Chemilumineszenz-Detektor (CLD) (ECO PHYSICS GmbH CLD 822 Mhr Analysator) und die Bestimmung

des Wasserdampfanteils im Abgas mittels Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR) (Ansyco GmbH FTIR DX4000N).

Für die Versuche mit geregeltem Schornsteinzug (12 Pa) konnte die Strömungsgeschwindigkeit mittels eines Flügelradanemometers (Höntzsch GmbH Flügelrad Strömungs-sensor ZS25/25-ZG4) in einer Verjüngung der Messstrecke (siehe Abbildung 5 links) ausreichend genau bestimmt werden. Zur Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit bzw. des Abgasmassenstromes im Naturzugschornstein, vor allem während der Abkühlphasen (Bestimmung der Stillstandsverluste siehe Abschnitt 4.3) wurde eigens ein hochtemperaturtaugliches Hitzdraht-Anemometer (Schmidt Technology GmbH SS 20.650) beschafft, um auch bei niedrigen Abgasgeschwindigkeiten (ohne Verjüngung) ausreichend genau messen zu können.

4.1.3 Bestimmung von Wassergehalt, Glühverlust, Aschegehalt und Elementaranalyse

Die Bestimmung des Wassergehaltes des eingesetzten Brennstoffes erfolgte nach DIN EN ISO 18134-2 mittels der vereinfachten Trockenschrankmethode in einem Trockenschrank (Binder GmbH Typ FED720-02-42004) [21]. Der Aschegehalt und Glühverlust wurden nach DIN EN ISO 18122 durch vollständiges Verglühen der Probe in einem Muffelofen (LT15 Nabatherm GmbH) bestimmt [20].

Die inhaltsstofflichen Analysen der gemahlenen Brennstoff- bzw. Holzkohleproben wurden von der EUROFINS Umwelt Ost GmbH durchgeführt. Die Bestimmung der Hauptbestandteile Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N) erfolgte nach DIN EN ISO 16948 [16], die Gesamtgehalte an Schwefel (S) und Chlor (CI) nach DIN EN ISO 16994 [19]. Der Gehalt an Sauerstoff (O) ergibt sich rechnerisch über den Abzug aller übrigen Elemente (inkl. des Aschegehalts) von der wasserfreien Gesamtbiomasse. Die Bestimmung der weiteren für die Verbrennung wichtigen Elemente Kalium (K), Natrium (Na), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Silizium (Si) erfolgte nach DIN EN ISO 16967 [17], die Bestimmung der Schwermetalle nach DIN EN ISO 16968 [18]. Die Probenherstellung erfolgte nach DIN EN ISO 14780 [22].

4.1.4 Eingesetzte Filter-, Dummy- und Katalysatorelemente

Um zu überprüfen, ob die Betriebsstunden eines Schaumkeramikfilters einen Einfluss auf die Emissionen haben (Abschnitt 4.2), wurden drei Paar Filterelemente (Abbildung 6) mit einer unterschiedlichen Anzahl an bereits absolvierten Abbränden (0, 200 und 500) von einem Forschungspartner beschafft. Die drei paarweise in den Ofen eingebauten Filterelemente sind aus demselben Ausgangsmaterial und weisen alle eine Porosität von 35 ppi (pores per inch) auf. Die Porosität beschreibt die Anzahl der Poren entlang einer Schnittfläche [45]. Analog zum Linienschnittverfahren werden dabei die Grenzen der Poren entlang eines Schnittes gezählt, d. h. je kleiner der Wert für die Porosität, desto offenporiger ist der Werkstoff.



Abbildung 6: Geprüfte Schaumkeramik Elemente: Unbenutzt (links), 200 Abbrände (Mitte), 550 Abbrände (rechts)

Neben den drei Filterpaaren wurde eine katalytisch beschichtete Schaumkeramik (Abbildung 7) der Firma Linder Katalysatoren GmbH verwendet. Das Trägermaterial besteht aus einer offenporigen (30 ppi) Schaumkeramik (SiC – SiO₂ + 3C \rightarrow SiC + 2 CO und Al₂O₃). Die Aktivierungstemperatur des Katalysators liegt laut Hersteller bei > 100 °C, die Hitzebeständigkeit bei > 1.700 °C. Der Hersteller gibt die katalytische Beschichtung als eine Mischung aus Platin, Palladium und Rhodium an.



Abbildung 7: Katalytisch beschichtete Schaumkeramik (links), "Dummy" Element für vergleichbare Strömungsbedingungen (Druckverluste) im Kaminofen (rechts)

Um die Effekte der Schaumkeramikfilter bzw. des Katalysators auf die Emissionen untereinander vergleichen zu können wurde ein "Dummy"-Element (Abbildung 7) aus einer 30 mm starken Vermiculit-Platte gefertigt, das einen zum Schaumkeramikfilter bzw. Katalysator vergleichbaren Druckverlust aufweist und damit zu ähnlichen Strömungsverhältnissen während des Abbrands führt, ohne dabei selbst eine filternde oder katalytische Eigenschaft zu besitzen. Hierdurch wird ausgeschlossen, dass es durch Fehlinterpretation von primärseitigen Effekten (z. B. durch Erhöhung des Druckverlusts, Änderung der Strömung, etc.) zu einer Über- bzw. Unterbewertung der Wirkung des katalytischen oder filternden Effektes auf den Schadstoffausstoß kommt. Für die Herstellung des "Dummy"-Elements wurde extra ein kleiner Prüfaufbau konstruiert, um die bestehenden Filterelemente hinsichtlich ihres Druckverlustes über variierende Volumenströme zu vermessen und das "Dummy"-Element so zu modifizieren, dass es einen vergleichbaren Druckverlustverlauf über den Volumenstrom aufweist wie der Schaumkeramikfilter und der Katalysator (siehe Abbildung 8). Verglichen mit den Schaumkeramikelementen hätte das Dummy-Element eine Porosität von ca. 0,9 – 1,1 ppi.



Abbildung 8: Überprüfung der Übereinstimmung der Druckverluste über den Normvolumenstrom der drei eingesetzten Elemente

4.1.5 Eingesetzte Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbegrenzer

Innerhalb des Projektes wurden insgesamt 3 nachrüstbare Ofensteuerungen, ein elektronischer sowie ein mechanischer Zugbegrenzer und der Prototyp einer neu entwickelten nachrüstbaren Verbrennungsluftsteuerung der Firma Kutzner + Weber (siehe Kapitel 5) untersucht. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht der einzelnen Steuerungen bzw. Zugbegrenzer und deren wichtigste Eigenschaften.

Testbedingung	Geregelter Zug			Naturzug	
Тур	TATAREK RT8OS-G-TD	Schmid SMR	K+W Compact	ATEC Florian	K+W Zugbegrenzer
Funktions- prinzip	Thermoelement + elektronische Klappe	Thermoelement + elektronische Klappe	Thermo-element + elektronische Klappe	Thermo-element + Druck und Geschwindig- keitssensor + elektronische Klappe + Lüfter	mechanische Klappe
Einbauort	Zuluftstutzen	Zuluftstutzen	Zuluftstutzen	zwischen Schornstein und Abgasrohr	zwischen Schornstein und Abgasrohr oder an der Schorn- steinsohle
Freier Rest- querschnitt	6,2 cm² bzw. 8 %	dicht schließend	9 cm² bzw. 8 %	-	-
Ungefährer Endkunden- preis inkl. Zubehör	276€	1.100€	1.070 € (ohne Display)	300€	300€

Tabelle 5:Übersicht der untersuchten Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbe-
grenzer

4.1.6 Abgestimmte Prüfmethode für optimierte Ofenkonzepte und Bauteile zur Optimierung von Öfen

Um neuartige Techniken und Geräte realitätsnah und reproduzierbar zu bewerten und innerhalb des Projektes zwischen den Projektpartnern vergleichbare Ergebnisse zu produzieren, wurde eine realitätsnahe, sich am tatsächlichen Praxisbetrieb orientierende Prüfmethode entwickelt und zwischen den Projektpartnern abgestimmt. Die Prüfmethoden wird im Folgenden kurz erläutert.

Messstrecke und Ausrüstung. Die Messstrecke sollte nach guter Laborpraxis unter Einhaltung der erforderlichen Ein- und Auslassstrecken und mit ausreichender Dichtigkeit nach den gültigen Normen DIN EN 13240 [12], DIN CEN/TS 15883 [13] sowie VDI 2066 [51] und den Herstellerangaben für die Sensoren hinsichtlich der Position der Messstellen ausgelegt werden. Die Position der Abgastemperaturmessung zur Wirkungsgradbestimmung sollte nach DIN EN 13240 [12] erfolgen. Die Messung der Abgastemperatur kann entweder mittels Thermoelement oder mittels Ansaug-Pyrometer durchgeführt werden. Bei Verwendung eines Ansaug-Pyrometers ist eine Geschwindigkeit im freien Querschnitt (5 \pm 1 mm) von 20 bis 25 m/s nach DIN EN 13240 [12] einzuhalten. Es ist keine Abbrandwaage erforderlich, da die Brennstoffauflagen einzeln gewogen werden.

Prüfablauf. Der im Projekt gewählte Prüfablauf soll die Emissionen und den Wirkungsgrad bzw. den Effekt der zu testenden Technologien, Konzepte und Geräte möglichst realitätsnah wiedergeben, um deren gute Weiterentwicklung hinsichtlich des späteren Praxisbetriebs zu ermöglichen. Daher wurde die Prüfmethode in Anlehnung an die Methode des EU Projektes "beReal" [42], das sich mit der praxis- und realitätsnahen Prüfung von Scheitholz- und Pellet-Kaminöfen beschäftigte, erarbeitet. Sie wurde hinsichtlich verschiedener Fragestellungen für automatische Verbrennungsluftsteuerungen und Katalysatoren erweitert.

Vor und nach allen Messungen an einem Ofen muss ein Dichtigkeitstest durch Anlegen eines Unterdrucks von 5 Pa, 10 Pa und 15 Pa (je 3 Wiederholungen) am Abgasstutzen bei abgedichtetem Verbrennungsluftstutzen (nach prEN 16510 [14]) durchgeführt werden. Die eigentlichen Verbrennungsversuche sind dann bei einem konstanten Schornsteinzug von 12 Pa (± 2 Pa) durchzuführen.

Der Brennstoffverbrauch ist durch das Wiegen der einzelnen Brennstoffauflagen vor dem Auflegen zu bestimmen. Eine Abbrandwaage ist dabei nicht erforderlich. Der Prüfbrennstoff sollte wahlweise Buchen- oder Birkenholz ohne Rinde mit einer dreieckigen Scheitgeometrie sein. Der Aschegehalt des Prüfbrennstoffs sollte < 1 % sein und der Wassergehalt sollte bei 16 m-% (\pm 4 m-%) liegen (Probenahme und Bestimmung ohne Verzögerung zum Feuerungsversuch).

Eine Prüfung besteht aus 8 aufeinanderfolgenden Brennstoffauflagen (1 Anzündauflage, 4 Volllastauflagen und 3 Teillastauflagen), sie beginnt mit dem Anzünden des Ofens im kalten Zustand und endet nach der Abkühlphase. Der Zeitpunkt des Nachlegens ist erreicht sobald der CO₂-Gehalt im Abgas entweder bei < 4 % (absolut) oder < 25 % (relativ) des maximalen CO₂ Gehalts (CO_{2max}) des jeweiligen Abbrands liegt. Wenn der maximale CO₂-Gehalt des Abbrands den Wert von 12 % (absolut) nicht überschreitet, erfolgt das Nachlegen des Brennstoffs erst bei 3 % CO₂-Gehalt im Abgas (absolut), d. h. wenn die Flammen bereits erloschen sind. Abbildung 9 zeigt eine schematische Darstellung eines Prüfzyklus inklusive aller Nachlegekriterien. Die Art und Weise wie der Brennraum mit Brennstoff zu befüllen ist sowie die Brennstoffmenge für Voll- und Teillastbetrieb ist entweder von Seiten des Herstellers oder des Forschungspartners in einem sogenannten "Quick-User-Guide" leicht nachvollziehbar zu beschreiben (vgl. Projekt "be-Real" [42]).



Abbildung 9: Schematischer Ablauf eines Prüfzyklus (PM: Gesamtstaubmessung; (PM): optionale Gesamtstaubmessung)

Das Schüren der Glut (d. h. das Ebnen des Glutbetts) ist nur bei Erreichen des Nachlegesignals direkt vor der Brennstoffaufgabe, sowie bei Verwendung einer automatischen Verbrennungsluftsteuerung vor einem optionalen Holzkohleausbrand gestattet. Während des Nachlegens darf die Feuerraumtüre maximal für 60 s geöffnet bleiben.

Die Lufteinstellungen (ohne automatische Verbrennungsluftsteuerung) müssen vom Hersteller vorgegeben sein ("Quick-User-Guide") und dürfen während der Abbrände nicht geändert werden. Es sind zwei bis maximal drei unterschiedliche Lufteinstellungen zulässig:

- Anzündabbrand + (wenn nötig) ein zweiter Aufheizabbrand
- Nennlastbetrieb
- Teillastbetrieb

Im Falle des Betriebs mit automatischer Verbrennungsluftsteuerung kann es zu einer verstärkten Zunahme des Glutbetts während der 5 Volllastabbrände kommen. Hierfür beinhalten manche Steuerungskonzepte einen sogenannten Holzkohleabbrand, in welchem gezielt durch Zufuhr von Primärluft durch den Rost die Holzkohle vollständig verbrannt wird. Dieser Holzkohleabbrand kann entweder bei Wechsel von Volllast auf Teillast oder am Ende des Teillastbetriebs erfolgen. Die Steuerung muss den Anfang und das Ende des Holzkohleabbrandes anzeigen (z. B über das Display). Während des Holzkohleabbrandes ist eine zusätzliche Staubmessung durchzuführen.

Zeitpunkt der Messung während des Holzkohleabbrands:

- Manueller Ofenbetrieb: kein separater Holzkohleabbrand und keine zusätzliche Messung
- Automatisch gesteuerte Öfen: Holzkohleabbrand und zusätzliche Messung entweder nach Abbrand 5 oder 8

Das Schüren des Glutbetts ist während des Holzkohleabbrands nur erlaubt wenn der Benutzer explizit von der Steuerung durch ein entsprechendes Signal dazu aufgefordert wird. Die Messung aller gasförmigen Komponenten sowie der Temperaturen und Abgasgeschwindigkeiten läuft während des gesamten Holzkohleabbrands unterbrechungsfrei weiter. Der Schornsteinzug wird unverändert bei -12 Pa (\pm 2 Pa) konstant gehalten.

Die Abkühlphase startet wenn am Ende des 8. Abbrands das o.g. Nachlegekriterium erfüllt ist oder die Steuerung zum Nachlegen auffordert bzw. am Ende des Holzkohleabbrandes, wenn dieser nach dem 8. Abbrand stattfindet. Die Abkühlphase endet wenn die Temperatur an der Normmessstelle nach DIN EN 13240 [12] unter 50 C fällt. Die Temperatur- und Volumenstrommessung wird nach Erreichen des Nachlegekriteriums oder Nachlegesignals der Steuerung fortgeführt. Die Auswertung der Wärmeverluste erfolgt vom Ende des 8. Abbrandes (bzw. dem Ende des Holzkohleabbrands) bis zum Erreichen der Abgastemperatur von 50 C, oder bis kein messbarer Volumenstrom mehr vorhanden ist (z. B. bei automatisch dicht schließende Verbrennungsluftklappe/n). **Quick-User-Guide.** Die Feuerstätte wird nach dem sog. "Quick-User-Guide", d. h. mit einer bebilderten Kurzanleitung auf einer DIN-A4 Seite, betrieben (Abbildung 10). Die Informationen für den Quick-User-Guide werden vom Hersteller bereitgestellt und beinhalten alle relevanten Angaben, die für den optimalen Betrieb der Feuerung in Nenn- und Teillast notwendig sind:

- Vorbereitung des Heizbetriebs
- Art des Anzündens (von oben oder von unten)
- Art des Nachlegens (Anzahl, Gewicht und Anordnung der Scheite im Brennraum)
- Anforderungen an den Brennstoff (Brennstoffmengen für Anzünden, Voll- und Teillastbetrieb, Brennstofffeuchte, Art des zulässigen Brennstoffs)
- Lufteinstellungen während und nach dem Heizbetrieb (Anzünden, Voll- und Teillastbetrieb)
1. Vorbereitung & Anzünden

- Reinigen und öffnen Sie das Rost und leeren Sie den Aschekasten
- Kreuzweise Lagen Anzündholz (3 Lagen) auf 3 Scheite Feuerholz (2 Lagen) auf dem Rost (Anzünden von oben) (Abb. 1 & Abb. 2)
- Scheitlänge: 25-33 cm
- Nutzen Sie nur trockenes naturbelassenes Holz min. 1 Jahr gelagert
 - 1. Lage 1 Scheit, 0.5 kg
 - 2. Lage 2 Scheite, je 0.5 kg
 - 3 Lagen Anzündholz, überkreuz gesamt: 0.6 kg
 - Die Gesamtmasse des Anzündabbrands ca. 2.1 kg (Abb. 2)
- Lufteinstellungen Anzünden:
 - Beipass: ganz offen "A" (Abb. 3)
 - Primärluft: ganz offen "Max" (Abb. 4)
 - Sekundärluft ganz offen "Max"(Abb. 5)
- Anzünden der Ofenanzünder (mittig platziert) (Abb. 1)
- Schließen der Feuerraumtür



2. Nachlegen

•	Legen Sie nach wenn die Flammen erlöschen oder keine Flammen mehr sichtbar sind und genug Glut vorhanden ist.		W INL .	
•	Nach dem ersten Abbrand: (Abb. 5) Scheitholz: 3 Scheite, je ca. 0,7 kg, Gesamtgewicht ca. 2.1 kg	124		
•	Teillastbetrieb: (Abb. 6) Scheitholz: 2 Scheite, Gesamtgewicht ca. 1.0 kg			
:	Die Platzierung der Scheite nach Abb. 6 – nur parallel zur Feuerraumtüre Lufteinstellungen Abbrand 2: Beingsst geschlossen "Z" (Abb. 7)	Abbildung 5	Abb	Aldung 6
	 Primär- und Sekundärluft: ganz offen (Abb. 4/5) Lufteinstellungen Nennlastbetrieb (nach 2. Abbrand): 	3	\sim	
	 Beipass: geschlossen "Z" (Abb. 7) Primärluft, ganz geschlossen "min" (Abb. 8) 	Abbildung 7	Abbildung 8	Abblidung 9
	 Sekundärluft, 20% geschlossen (Abb. 9) Lufteinstellungen Teillastbetrieb: 			
	 Beipass: geschlossen "Z" (Abb. 7) Primärluft, ganz geschlossen "min" (Abb. 8) 	Abbildung 10		
	 Sekundärluft, 40% geschlossen (Abb. 10) 			
3.	Ende des Heizbetriebs			

- Wenn die Flammen erloschen sind (Abb. 11)
 - Schließen Sie die Luftklappen um Wärmeverlusten zu vermeiden
 - Primärluft, ganz geschlossen "min" (Abb. 12)
 - Sekundärluft, ganz geschlossen "min"(Abb. 13)



ACHTUNG:

Von dem hier beschriebenen Vorgehen abweichende Bedienung des Gerätes kann zu nicht optimalem Betriebsverhalten führen. Die Anforderungen an Emissionen und Wirkungsgrad können dann nicht gewährleistet werden.

Abbildung 10: Beispiel eines Quick-User-Guide für den Kaminofen Hark 44 GT ECOplus (erstellt von TFZ im Rahmen des beReal Projekts [42]) **Prüfablauf mit automatischer Steuerung oder Regelung der Feuerstätte.** Wenn die steuernde oder regelnde Komponente (Klappe, Schieber etc.) im Abgasweg nach dem Ofen verbaut ist, wird die Prüfung an einem Naturzugschornstein durchgeführt (vgl. Abbildung 5 rechts). Bei einer Steuerung oder Regelung der Verbrennungsluft ist die Prüfung bei einem konstanten Schornsteinzug von -12 Pa (\pm 2 Pa) durchzuführen. Verfügt die Steuerung oder Regelung über ein Nachlegesignal (optisch oder akustisch), sollte dieses Nachlegesignal verwendet werden, auch wenn es zeitlich vor dem o.g. CO₂-Kriterium erreicht ist.

Um den Effekt der Steuerung oder Regelung im Vergleich zu dem gewöhnlichen Kaminofen bewerten zu können, ist eine Prüfung (3 Wiederholungen des Prüfzyklus von 8 Abbränden) ohne Steuerung oder Regelung (Handbetrieb) durchzuführen (Nachlegezeitpunkt nach CO₂-Kriterium).

Messung der gasförmigen Komponenten. Die zu messenden gasförmigen Komponenten (Messbereiche und zulässige Unsicherheiten) umfassen:

- O₂ 0 Vol.-% 21 Vol.-%, ± 0,4 Vol.-%
- CO₂ 0 Vol.-% 20 Vol.-%, ± 0,4 Vol.-%
- CO 0 ppm 15.000 ppm, ± 10 %

(0 – 500 ppm, ± 10 ppm und 0 – 3000 ppm, ± 45 ppm)

• NO_x 0 ppm – 500 ppm, ± 5 %

40

• Org.-C 0 ppm – 10.000 ppm, ± 5 % des Messbereichsendwerts

Die gasförmigen Komponenten sind kontinuierlich über den gesamten Prüfzyklus (inkl. vor dem Anzünden) über alle Abbrände zu erfassen. Das Aufzeichnungsintervall zur Erfassung der Messdaten muss ≤ 10 sec sein.

Messung der Abgasgeschwindigkeit. Für die Messung der Abgasgeschwindigkeit sind geeignete Sensoren zu verwenden (Flügelradanemometer, Prandtl Staurohr oder Hitzdrahtanemometer). Der untere Messbereichsendwert sollte dabei $\leq 0,2$ m/s betragen. Die Messgenauigkeit kann durch Einbau einer Verjüngung in die Messstrecke (Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit) erhöht werden.

Messung der Gesamtstaubemissionen. Die Messung der Gesamtstaubemissionen erfolgt entweder während den Abbränden 1, 3, 5 und 7 oder, wenn möglich, während allen Abbränden (erfordert zwei unabhängige Staubsonden). Die erste Staubmessung startet bei kaltem Ofen unmittelbar vor dem Anzünden (d. h. wenn die Flamme des Streichholzes/Feuerzeugs den Anzünder berührt), bzw. vor dem Öffnen der Feuerraumtür zum Nachlegen.

Als Filtermaterial empfiehlt sich die Verwendung von mit Quarzwolle gestopften Filterhülsen mit nachgeschaltetem Quarzfaser-Planfilter. Durch eine solche Kombination kann in der Regel sichergestellt werden, dass ein kompletter Abbrand ohne Unterbrechung mit einem Filter gemessen werden kann. Die Vor- und Nachbehandlung der Filter erfolgt bei 180 °C für mindestens 1 h bei anschließender Abkühlung in einem Exsikkator für mindestens 8 h. Die Filtrationstemperatur ist bei konstant 180 °C zu halten (wie auch bei der Messung der Org.-C Emissionen).

Bei einem Durchmesser des Abgasstutzens von 150 mm (typisch für Kaminöfen) sollte der Düsendurchmesser der Staubsonde 12 mm betragen. Die Düsenöffnung muss in Richtung des Abgasstromes ausgerichtet sein. Während der Gesamtstaubmessung müssen entweder isokinetische oder über-isokinetische Bedingungen an der Düse sichergestellt werden.

Nach Beenden eines Prüfzyklusses ist die Staubsonde (d. h. Düse, 90 Krümmer, Verbindungsrohr) mit Aceton zu spülen (siehe Abbildung 11). Dieser Vorgang sollte 2 – 3mal wiederholt werden. Die Suspension aus Rückständen und Aceton ist dann in einem explosionsgeschützten Abdampfschrank zu verdampfen. Das Spülgefäß durchläuft nach dem Abdampfen des Azetons dieselbe Nachbehandlung wie die beladenen Filter (1 h bei 180 °C und \geq 8 h Abkühlen in einem Exsikkator). Die Rückstände des Spülens werden dann gewogen und proportional zur Filterbeladung der Staubfilter (aus derselben Probenahmesonde) auf die einzelnen Messungen verteilt.





Abbildung 11: Spülen der Probenahmesonde nach der Staubmessung (Quelle: TFZ)

Auswertung der Messdaten. Die Emissionen werden in mg/MJ, basierend auf dem Volumenstrom, der Konzentration in ppm (Messsignal der Gasanalysatoren) und der Differenz aus eingesetzter Brennstoffmasse und der Masse der Rückstände (Holzkohle) aus dem Kaminofen berechnet.

$$E_{\frac{mg}{MJ}} = \frac{\sum (E_{ppm} \times \rho_{n,E} \times \dot{V}_{n,t} \times \Delta t)}{m_{Br} \times H_{u,Br} - (m_R - m_{Br} \times A_{Br}) \times H u_{Hk}}$$
(4.1)

Wobei:

 $E_{\overline{MJ}} = Emissionsmittelwert in mg/MJ,$ $E_{ppm} = Emissionskonzentration in ppm,$ $\rho_{n,E} = Normdichte der Gaskomponente,$ $\dot{V}_{n,t} = Volumenstrom normiert und trocken in Nm³/h,$ $\Delta t = Zeitintervall der Datenerfassung (\leq 10 sec) in h,$ $m_{Br} = gesamte Brennstoffmasse (trocken) in kg,$ $H_{u,Br} = Heizwert Brennstoff (trocken) in MJ/kg,$ $m_{R} = Masse Rückstand gesamt (trocken) in kg,$ $A_{Br} = Aschegehalt des Brennstoffs (trocken) in m.-% und$ $Hu_{Hk} = Heizwert Holzkohle (trocknen) in MJ/kg ist.$

Zum Vergleich mit Grenzwerten können die Emissionen in mg/Nm³ bei 13 % O₂ durch folgenden nicht allgemeingültigen Faktor grob abgeschätzt werden [30]:

$$E_{mg/Nm^3} (13 \% 02) = E_{mg/MJ} \times 1,576$$
(4.2)

Wobei:

 $E_{\rm mg/Nm^3}$ der Emissionswert in mg/Nm³ trocken bei 0 °C und 1013 hPa und

 $E_{mg/MJ}$ der Emissionswert in mg/MJ trocken ist.

Die Berechnung des Wirkungsgrades erfolgt über den kompletten Messzyklus in Anlehnung an DIN EN 13240 [12] bzw. DIN EN 16510 [14]. Zusätzlich werden die Verluste während der Abkühlphase (q_{cool} in %) sowie die Verluste durch unverbrannte Rückstände (q_r in %) bestimmt. Dieses Vorgehen weicht ab von der Vorgabe der derzeitig gültigen DIN EN 13240 [12] sowie der zukünftigen DIN EN 16510 [14]. Darin wird für die Verluste durch unverbrannte Rückstände ein fester Wert von 0,5 % angenommen und entsprechend verrechnet. Der Wirkungsgrad wird als zeitlich gewichteter Mittelwert über alle Abbrände (1 – 8) ermittelt. Lediglich bei Feuerungen mit automatischer Steuerung bzw. Regelung wird der Holzkohleausbrand (falls er als eigene Phase vorgesehen ist) als zusätzlicher Abbrand gewertet und fließt mit in die Mittelwertbildung ein (9 Abbrände, vgl. oben). Die thermischen Abgasverluste sind während der gesamten Verbrennung und während des Abkühlvorgangs zu ermitteln. Wenn die Feuerung eine vollständig dichte Absperrung der Verbrennungsluft zulässt (d.h. der gemessene Abgasvolumenstrom ist geringer als der untere Messbereich des Strömungssensors von $\leq 0,2$ m/s) können die Verluste der Abkühlphase ab dem Zeitpunkt, zu dem kein Volumenstrom mehr im Abgas messbar ist, gleich Null gesetzt werden. Die chemischen Abgasverluste (q_b in %) werden ab dem Zeitpunkt des Anzündens solange berücksichtigt, bis der Sauerstoffgehalt im Abgas nach dem letzten Abbrand wieder auf 18 Vol.-% angestiegen ist oder ein automatischer, dichter Abschluss der Verbrennungsluft stattfindet. Der Wirkungsgrad unter der Berücksichtigung der Wärmeverluste während des Abkühlens und der Rückstände lässt sich wie folgt berechnen:

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_c + q_{cool}) \tag{4.3}$$

$$q_a = \frac{100 \times Q_a}{Hu_{Br,f}} \tag{4.4}$$

$$Q_a = (T_{Ag} - T_{amb}) \times \left(\frac{C_{p,Ag} \times (C_{Br} - C_r)}{0,536 \times (CO + CO_2)} + C_{P,Agw} \times 1,244 \times \left(\frac{9H_{Br} + W_{Br}}{100}\right)\right)$$
(4.5)

$$q_b = \frac{100 \times Q_b}{Hu_{Br,f}}, \ Q_b = 12644 \times CO \times \frac{C_{Br} - C_r}{0.536 \times (CO + CO_2) \times 100}$$
(4.6)

$$q_{cool} = \frac{\sum \dot{m}_{Luft} \times \Delta t \times c_{p_{Luft}} \times \Delta T}{m_{Br} \times Hu_{Br}}; \Delta T = T_{Ag} - T_{amb}$$
(4.7)

$$q_c = \frac{m_r - m_{Br} \times A \times H u_{Hk}}{m_{Br} \times H u_{Br}} \times 100\%$$
(4.8)

Wobei:

 η = Wirkungsgrad in %;

 $q_{\rm a}$ = thermische Verluste in %,

 $q_{\rm b}$ = chemische Verluste in %,

 $q_{\rm c}$ = Verluste aus unverbrannten Rückständen in %,

- $q_{\rm cool}$ = Wärmeverluste während des Abkühlvorgangs in %,
- $Q_{\rm a}$ = thermische Verluste bezogen auf Brennstoffenergie in kJ/kg,
- $Hu_{\rm Br}$ = Heizwert des Brennstoffs (trocken) in kJ/kg,
- $Hu_{\rm Br,f}$ Heizwert des Brennstoffs (feucht) in kJ/kg,
- T_{Ag} = Temperatur des Abgases an Normmessstelle in °C

 $T_{\rm amb}$ = Umgebungstemperatur in °C,

 $C_{p,Ag}$ = spezifische Wärmekapazität des trockenen Abgas, temperaturabhängig in kJ/(K m³),

- $C_{\rm Br}$ = Kohlenstoffgehalt des Brennstoffs in m.-%;
- C_r = Kohlenstoffgehalt des Rückstands bezogen in m.-% (Literaturwert möglich),
- $H_{\rm Br}$ = Wasserstoffgehalt des Brennstoffs in m.-%,
- $W_{\rm Br}$ = Wassergehalt des Brennstoffs in m.-%,
- C_{P,Agw} = spezifische Wärmekapazität des Abgas (feucht) in kJ/(K m³);,
- CO = Kohlenmonoxidgehalt im trockenen Abgas in %,
- CO2 = Kohlendioxidgehalt im trockenen Abgas in %,
- $Q_{\rm b}$ = chemische Verluste bezogen auf Brennstoffenergie in kJ/kg,
- \dot{m}_{Luft} = mittlerer Luftmassenstrom innerhalb eines Messintervalls (≤ 10 sec) in kg/s,

 $\Delta t = Messintervall in sec,$

- c_{pLuft} = spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur der Luft an der Normessstelle in kJ/(kg K),
- ΔT = Temperaturdifferenz in K
- $m_{\rm r}$ = Masse des gesamten trockenen Rückstandes (Brennraum + Aschekasten) in kg,
- A = Aschegehalt (trocken) in m.-% und
- Hu_{Hk} = Heizwert von Holzkohle (trocken) in kJ/kg ist.

Prüfablauf für Öfen mit integriertem Katalysator. Um auch eine Abschätzung der Langzeitabscheideleistung von Katalysatoren im hohen oder mittleren Temperaturbereich (je nach Einbauort) zu ermöglichen, wurde ein "Langzeitversuch" (2 Wochen Dauerbetrieb a 5 Werktage) mit jedem Katalysator durchgeführt werden. Der Ofen inkl. Katalysator wurde dabei während dieser zwei Wochen täglich an allen Werktagen betrieben. Innerhalb der 2 Wochen wurden 4 zeitlich fest vorgegebene Prüfzyklen gemessen und die Minderung an CO, Org.-C und Gesamtstaubemissionen durch den Katalysator ermittelt. Zusätzlich wurde der Effekt der Reinigung des Katalysators mittels Bürste und Druckluft auf die Katalysatorwirkung und den Druckverlust nach 2 Wochen Betrieb untersucht.

Der Ablauf der einzelnen Prüfzyklen erfolgt dabei nach der bereits beschriebenen Methode. Die Untersuchung der Katalysatoren erfolgt entweder durch die Messung mittels geteiltem Abgaskanal (Parallelmessung von Dummy und Katalysator) wie in Abbildung 12 dargestellt oder durch eine separate Prüfung von Dummy und Katalysator. Dabei war nach einem Prüfzyklus mit dem Katalysator (8 Abbrände) immer ein zusätzlicher Prüfzyklus mit Dummy (8 Abbrände) durchzuführen. Als Dummy (d.h. Attrappe) war das gleiche Trägermaterial wie das des Katalysators, jedoch nur ohne katalytische Beschichtung, zu verwenden (d. h. vergleichbarer Druckverlust, siehe Abschnitt 4.1.4). Die Verwendung eines Dummys als Referenz ist wichtig, um den Einfluss von Primäreffekten auf die Feuerung bei der Bewertung des Katalysators auszuschließen, die durch den physikalischen Einbau des Katalysators, nicht jedoch durch dessen katalytische Wirkung entstehen können, z. B. die Änderung des Druckverlusts und der Strömungsverhältnisse.



Abbildung 12: Exemplarischer Prüfstandsaufbau für die Katalysatormessung mit geteiltem Abgaskanal

Die Messung der Abgastemperatur vor und nach dem Katalysator sowie des Druckverlusts über den Katalysator sollte dabei zwingend durchgeführt werden. Dies ermöglicht z. B. die Auswertung der Aktivierungstemperatur des Katalysators, d. h. die Zeit vom Anzünden des Brennstoffs bis zum Eintritt einer signifikanten Minderung der Emissionen durch den Katalysator.

Die Feuerung war mit eingebautem Katalysator über insgesamt mindestens 2,5 Wochen (d. h. 10 Arbeitstage + 2) zu betreiben. Innerhalb dieser Zeit waren folgende Messungen durchzuführen, entweder jeweils mit einem Prüfzyklus bei Parallelmessung von Katalysator und Dummy (geteilter Abgaskanal) oder mit jeweils zwei Prüfzyklen, einmal mit Katalysator und einmal mit dem Dummy (bei Messung ohne geteilten Abgaskanal):

- Tag eins des Betriebs (Lieferzustand:)
- Nach einer Woche Betrieb (Tag 6)
- Nach zwei Wochen Betrieb (Tag 11)
- Nach manueller Reinigung des Katalysators nach 2 Wochen Betriebsdauer (Tag 12)

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt wie bereits oben beschrieben. Die Minderung der Emissionen durch den Katalysator wird über den Differenzbetrag der Emissionen mit Katalysator und der Emissionen mit Dummy berechnet.

4.1.7 Statistische Analysen der Messergebnisse

Alle statistischen Analysen der Messdaten wurden mit OriginPro 2015 durchgeführt. Für den Test auf Normalverteilung der Messdaten wurde der Shapiro-Wilk Test verwendet. Für die Varianzanalyse kam eine einfache ANOVA zum Einsatz. Die Messdaten wurden als normalverteilt bzw. signifikant angenommen, sobald der p-Wert ≤ 0,5 war. Wenn in den folgenden Abschnitten also von Signifikanz gesprochen wird, sind stets diese Bedingungen erfüllt.

4.2 Test und Bewertung des Langzeitverhaltens von Schaumkeramikfiltern in Kaminöfen und deren Ersatz durch Katalysatoren.

Der folgende Abschnitt beschreibt die Ergebnisse der Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Schaumkeramikfiltern in Kaminöfen und deren Ersatz durch Katalysatoren. Die Ergebnisse wurden unter anderem auf der 24. European Biomass Conference & Exhibition präsentiert und veröffentlicht [38].

Für die Versuche wurde die in Abschnitt 4.1.2 beschriebene Messtechnik und der Prüfstandaufbau nach Abbildung 5 (links) mit geregeltem Schornsteinzug sowie die in Abschnitt 4.1.6 beschriebene Prüfmethode verwendet.

4.2.1 Vorversuche zur Luftströmung innerhalb des Kaminofens

Um das Strömungsverhalten durch und um die Schaumkeramik zu untersuchen, wurden Vorversuche in Anlehnung an eine Veröffentlichung von AIGENBAUER et al. [48] durchgeführt. Hierzu muss sichergestellt werden, dass die Luftströmung ausschließlich durch die Schaumkeramik geleitet wird. Dafür wurde am Abgasstutzen des Ofens ein konstanter Unterdruck von 12 Pa angelegt und der Volumenstrom durch den Kaminofen sowie der Druckverlust über die Schaumkeramik bzw. den Kaminofen gemessen. Anschließend wurden alle undichten Stellen (Lücken zwischen den Ofenverkleidungen und der Schaumkeramik) nach und nach in 4 Schritten mit luftdichtem Klebeband abgeklebt:

- Schritt 1: Lieferzustand
- Schritt 2: Schaumkeramik abgeklebt (Abbildung 13, links)
- Schritt 3: Alle undichten Stellen abgeklebt (Schaumkeramik und Lücken zwischen Feuerraumverkleidung)
- Schritt 4: Alle undichten Stellen abgeklebt, Klebeband von Schaumkeramik wieder entfernt (Abbildung 13, rechts)



Abbildung 13: Vorversuche zum Strömungsverhalten: Schritt 2: Schaumkeramik abgeklebt (links), Schritt 4: alle undichten Stellen abgeklebt, Klebeband von Schaumkeramik wieder entfernt (rechts)

Die Ergebnisse der Vorversuche zeigen deutlich, dass die Abgase des Kaminofens während des Betriebs mit großer Wahrscheinlichkeit nicht ausschließlich durch die Schaumkeramik strömen (Tabelle 6). Da der Volumenstrom sowie der Druckverlust in Schritt 2 (Abbildung 13, links) und Schritt 4 (Abbildung 13, rechts) nahezu identisch ist liegt die Vermutung nahe, dass sich die Abgase während des Betriebs zu annähernd gleichen Teilen den Weg durch die Schaumkeramik sowie die Lücken in der Feuerraumverkleidung suchen.

Schritt	Schornsteinzug [Pa]	Volumenstrom [Nm ³ /h]	Druckverlust [Pa]
1: Lieferzustand	-11,8	35,4	3,2
2: Schaumkeramik abgeklebt	-11,9	33,9	3,8
3: Alle undichten Stellen abgeklebt	-11,8	21,2	9,1
4: Alle undichten Stellen abgeklebt, Schaumkeramik wieder frei	-12,0	33,9	3,9

Tabelle 6:	Ergebnisse des Vorversuchs zur Strömung durch und um die Schaumke-
	ramik

4.2.2 Langzeitverhalten von nicht-katalytisch-beschichteten Schaumkeramikelementen

Im direkten Vergleich der gasförmigen Emission (Abbildung 14) zeigten sich beim Einsatz der drei untersuchten Alterungsstufen der Schaumkeramik (siehe Abschnitt 4.1.4 Abbildung 6) zwar leichte Unterschiede, jedoch zeichnete sich kein eindeutiger Trend bezüglich der Alterungswirkung ab. Ähnlich verhält es sich auch hinsichtlich der Gesamtstaubemissionen (Abbildung *15*). Auffallend ist hier nur der mit 52 mg/MJ etwas niedrigere Wert für das Schaumkeramikpaar mit 550 absolvierten Abbränden. CO, Org.-C und Gesamtstaubemissionen weisen keinen signifikanten Unterschied zwischen den Einzelwerten (3 Messungen) der getesteten Schaumkeramiken auf. Dies könnte an einem durch Anhaftungen verringerten Porendurchmesser bzw. einer verringerten Porenanzahl liegen, die auch optisch leicht erkennbar ist (vgl. Abbildung 6 (rechts) unter Abschnitt 4.1.4).



Abbildung 14: Gasförmige Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der drei untersuchten nicht katalytisch beschichteten Schaumkeramik-Paare im Vergleich



Abbildung 15: Gesamtstaubemissionen der drei untersuchten Schaumkeramik-Paare im Vergleich



Abbildung 16: Spülen der Schaumkeramikplatten und anschließendes Abdampfen der Spülflüssigkeit

Ein Versuch zur Abschätzung des Verschmutzungsgrades der Schamkeramikplatten konnte diese Hypothese allerdings nicht bestätigen. Hierzu wurden die Platten nach Ende der Messreihen mit vollentsalztem Wasser gewaschen und das Wasser anschließend abgedampft (Abbildung 16). Die größte Menge an Rückständen fand sich danach im Spülwasser des Schaumkeramikpaares mit 200 Abbränden vor- bzw. 236 Abbränden nach Versuchsende (Tabelle 7). Die größte Menge an Rückständen hätte sich theore-

tisch jedoch in der Schaumkeramik mit 586 Abbränden (nach Versuchsende) wiederfinden müssen. Der mittlere Normvolumenstrom über 8 Abbrände lag während der durchgeführten Messungen bei ca. 50 – 56 Nm³/h. Die mittlere Abbranddauer lag bei ca. 28 min inkl. Teillastabbrände. Daraus folg ein mittleres Normvolumen von 23,5 -26,3 Nm³ pro Abbrand. Würde man für den Fall der neuen Schaumkeramik annehmen, dass die mittleren Staubemissionen vor dem Filter bei 70,4 mg/Nm³ lägen, so dass man mit einer Abscheiderate von 10 % auf einen mittleren Staubgehalt von 64 mg/Nm³ (siehe würde dies einer akkumulierten Abbildung 15) käme, Staubmenge von 70,4 mg/Nm³ × 0,1 ×23,5 Nm³ = 0,165 g pro Abbrand entsprechen. Bei 88 absolvierten Abbränden wären dies ca. 14,6 g, bei 236 Abbränden ca. 38,9 g und bei 586 Abbränden ca. 96,7 g. Die hier festgestellten Mengen sprechen also nicht für eine signifikante Abscheidung von Partikeln, selbst wenn man davon ausgeht, dass ein Teil der Akkumulierten Partikel wieder verbrannt wird.

suchsaurchluhrung	
Abbrände nach Versuchsende [-]	Rückstände aus dem Spülwasser [g]
88	8,5
236	18,7
586	7,4

Tabelle 7:Ergebnisse des Spülversuchs mit den Schaumkeramik-Paaren nach Ver-
suchsdurchführung

4.2.3 Ersatzes der Schaumkeramikelemente durch katalytisch beschichtete Schaumkeramikelemente

Für die Bewertung der katalytischen Schaumkeramik wurde die herstellerseitig verbaute, nicht-katalytische Schaumkeramik im Wechsel mit den in Abschnitt 4.1.4 beschriebenem Katalysator und Dummy (vgl. Abbildung 7) ausgetauscht und in je 3 vollständigen Prüfzyklen à 8 Abbrände vermessen. Somit folgte auf die Messung mit der nicht-katalytischen Schaumkeramik eine Messung mit Katalysator, gefolgt von einer Messung mit Dummy. Diese Reihenfolge wurde 3-mal wiederholt.

Vergleicht man die in Abbildung 17 dargestellten CO-Emissionen des Katalysators und der nicht-katalytischen Schaumkeramik sowie die relativen Abweichungen dieser zum Dummy, wird deutlich das die herstellerseitig verbaute Schaumkeramik hinsichtlich der CO-Emissionen keinen positiven Effekt bringt. Der Katalysator führt dagegen mit rund 43 % zu einer signifikanten Reduzierung der CO-Emissionen. Abbildung 18 zeigt die Nicht-Methan Kohlenwasserstoff-Emissionen (Nicht-CH₄-Org.-C) der untersuchten Elemente im Vergleich. Hierbei wird der Anteil an Methan (CH₄) (FTIR) aus den Org.-C Emissionen (FID) mittels eines Response-Faktors (r-CH₄) herausgerechnet (FID-FTIR×r-CH₄), da CH₄ mittels heterogener Katalyse bei den im Kaminofen herrschenden Tempe-

raturen nicht zu CO₂ aufoxidiert werden kann [6]. Auch bei den Nicht-CH₄-Org.-C-Emissionen zeigt sich kein signifikanter Vorteil der Schaumkeramik gegenüber dem Dummy, jedoch eine Minimierung der nicht-Methan-Org.-C Emissionen von rund 21 % beim Einsatz des Katalysators im Vergleich zum Dummy; diese Reduktion ist allerdings nicht signifikant.



Abbildung 17: Vergleich der CO-Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ_{Dummy})



Abbildung 18: Vergleich der Nicht-Methan Kohlenwasserstoff-Emissionen mit Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ_{Dummy})

Wie erwartet zeigen die CH₄-Emissionen (Abbildung 18) nahezu keinen Unterschied zwischen den untersuchten Elementen, da auch der Katalysator nicht auf eine katalytische Reduzierung von CH₄ ausgelegt ist. Hierzu ist die Temperatur am Katalysator (Abbildung 20) mit durchschnittlich 431 °C während der Volllastabbrände und 399 °C während der Teillastabbrände deutlich zu gering. Bei diesen Temperaturen verhält sich Methan noch sehr stabil, erst oberhalb von 650 °C soll eine signifikante Umsetzung von Methan an heterogenen Katalysatoren möglich sein [6].



Abbildung 19: Vergleich der CH₄ Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ_{Dummy})



Abbildung 20: Maximale und minimale Temperaturen sowie durchschnittliche Temperaturen während der Messung bei Nenn- bzw. Teillast

Der Katalysatorhersteller wirbt neben der Minderung der CO- und Org.-C-Emissionen auch mit einer Minderung der Gesamtstaub- und NO_x-Emissionen. Hinsichtlich der Gesamtstaubemissionen konnte im Vergleich mit dem Dummy allerdings keine signifikante Minderung durch den Katalysator erzielt werden (Abbildung 21). Vergleicht man jedoch den Dummy oder den Katalysator mit dem Schaumkeramikelement (Abbildung 21 und Abbildung 15), so fällt auf, dass die Gesamtstaubemissionen bei Verwendung des Schaumkeramikelements deutlich höher ausfallen. Ein Grund hierfür könnte die unterschiedliche Porosität der Elemente (siehe Abschnitt 4.1.4) sein. Die Druckverluste von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sind zwar vergleichbar, jedoch ist die Porosität des Dummys nur 0.9 - 1.1 ppi. Die Porosität des Katalysators ist mit 30 ppi dagegen sehr ähnlich zu der Porosität der Schaumkeramik (35 ppi).

Vergleicht man die Gesamtstaubemissionen mit Katalysator mit den Ergebnissen zum Schaumkeramik-Einsatz so würde sich eine nicht signifikante Minderung der Gesamtstaubemissionen von ca. 23 % ergeben. Man könnte aus diesen Ergebnissen also schlussfolgern, dass es zwar einen positiven katalytischen Effekt auf die Staubemissionen aus unvollständiger Verbrennung (d. h. organische Partikel) gibt (Vergleich Schaumkeramik und Katalysator), dieser aber durch sich negativ auf die Verbrennung auswirkende Primäreffekte des Schaumkeramik-Trägermaterials (Vergleich Schaumkeramik und Dummy) wieder aufgehoben werden. Ein Grund könnte sein, dass die Schaumkeramikelemente im kalten Zustand zwar einen vergleichbaren Druckverlust zu dem Dummy-Element aufweisen, sich die bei steigender Temperatur höhere Viskosität von Gasen



[50] bei den engen Strömungskanälen der Schaumkeramik aber negativ auswirkt. Hierfür wären weitere Untersuchungen notwendig, die im Zeitrahmen des Projektes nicht mehr möglich waren.

Abbildung 21: Vergleich der Gesamtstaubemissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ_{Dummy})

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für die in Abbildung 22 dargestellten NO_x-Emissionen. Diese liegen sowohl für die Schaumkeramik als auch für den Katalysator auf einem etwas höheren Niveau als bei Einsatz des Dummys. Das bedeutet, dass es entgegen der Aussage des Herstellers zu keiner katalytisch bedingten Reduzierung der NO_x Emissionen kam. Die NO_x-Emissionen mit Katalysator liegen zwar mit 72 mg/MJ um etwa 4 % niedriger als bei Einsatz der Schaumkeramik, dies ist vermutlich aber eher auf die doch erhöhten Schwankungen der Messwerte bei Kaminöfen (siehe Fehlerbalken) als auf katalytische Effekte zurückzuführen. Die Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen in der Literatur [1], in der verschiedene Katalysatoreinbauten direkt hinter dem Abgasstutzen eines Kaminofens getestet wurden und ebenfalls niedrigere NO_x-Emissionen für den Referenzfall (in dem Fall ganz ohne Einbau) gemessen wurden. Allerdings führt die genannte Studie die erhöhten NO_x-Emissionen auf den katalytischen Effekt der eingebauten Elemente zurück, wobei die hier vorliegenden Ergebnisse eher auf die Wirkung der Schaumkeramik an sich, die ja auch das Trägermaterial des Katalysators darstellt, hindeuten.



Abbildung 22: Vergleich der NO_x -Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ_{Dummy})

Viele der beobachteten Ergebnisse lassen sich über die Temperatur am Katalysator erklären. Die Auswertung der mit Hilfe eines 1 mm starken Typ-K Thermoelements erfasste Temperatur im Katalysator ist in Abbildung 20 dargestellt. Die mittlere Temperatur während des Nennlastbetriebs liegt bei 431 °C und bei 399 °C im Teillastbetrieb. Die durchschnittliche Maximaltemperatur (erste Minuten nach dem Nachlegen) liegt mit 543 °C deutlich unter der vom Hersteller angegebenen Grenze für die Hitzebeständigkeit von > 1.700 °C. Die Minimaltemperaturen liegen bei durchschnittlich 264 °C (erster Abbrand und Ende der Abbrände), wobei diese vor allem im ersten Abbrand phasenweise auch noch deutlich unter der vom Hersteller angegebenen Aktivierungstemperatur des Katalysators von 100 °C liegen kann (siehe Fehlerbalken in Abbildung 20).

Die Aktivierungstemperaturen für die Oxidation von CO zu CO₂ liegen laut Literatur je nach Mischung der für die katalytische Aktivierung verwendeten Edelmetalle und je nach Abgaszusammensetzung zwischen 200 °C und 350 °C [7] [26] [27]. Diese Temperaturen können über den größten Teil der Nenn- und Teillastabbrände erreicht so dass eine CO-Reduktion zu erwarten ist. Für Methan liegt die Aktivierungsenergie laut Literaturangaben in Abhängigkeit der Edelmetall- und Abgaszusammensetzung durchschnittlich zwischen 500 °C und 650 °C [6] [26]. Diese Bereiche wurden in den dargestellten Versuchen nur in kurzen Temperaturspitzen (nach dem Nachlegen) erreicht. Folglich wurde auch kein Effekt des Katalysators zur CH₄-Reduktion in den Versuchen beobachtet. Die Aktivierungsenergie für die Konvertierung von Org.-C liegt ca. zwischen 300 und 400 °C, allerdings steigt die Konversionsrate ab der Aktivierungstemperatur bis ca. 800 °C an [6].

Dies bedeutet, dass der getestete Katalysator bei den hier vorherrschenden Temperaturen von durchschnittlich ca. 399 – 431 °C zwar die meiste Zeit "aktiv" für die Umsetzung von CO und Org.-C ist, die Konversionsraten jedoch bei höheren Temperaturen z. B. durch Optimierung der Brennraumgeometrie, Isolierung oder Position des Katalysators noch deutlich höher und zeitlich länger seien könnten. Diese wurde auch von den anderen Projektpartnern innerhalb des Projektes beobachtet (siehe <u>Catalyst Report [8]</u>).

4.2.4 Langzeitverhalten des Katalysators

Um sicherzustellen, dass der Katalysator während der "Langzeitmessungen" mit dem kompletten Abgas durchströmt wird, wurden alle bereits in Abschnitt 4.2.1 erkannten undichten Stellen mit feuerfestem Keramikkleber abgedichtet (Abbildung 23). Zusätzlich wurden Messstellen zur Erfassung der Feuerraumtemperatur und des statischen Drucks vor dem Katalysator eingerichtet.

Die Ergebnisse zu den Messungen an CO, Nicht-CH₄-Org.-C und Gesamtstaub an Tag 1 bestätigen die Ergebnisse aus Abschnitt 4.2.3 zwischen Katalysator und Dummy. Die CO-Emissionen (Abbildung 24) der Langzeitmessung lagen am ersten und am sechsten Tag der Messung nahezu konstant bei 995 mg/MJ (Tag 1) und 968 mg/MJ (Tag 6). Zwischen Tag 6 und Tag 11 zeigte sich dann eine deutliche Zunahme der CO-Emissionen von 968 mg/MJ auf 1.675 mg/MJ. Durch die Reinigung des Katalysators mit Druckluft und Bürste zwischen Tag 11 und Tag 12 konnte die Wirkung des Katalysators auf die CO-Emissionen teilweise wiederherstellt werden. Ein ähnliches Bild, allerdings mit einem deutlicheren Trend bereits zwischen Tag 1 (61 mg/MJ) und Tag 6 (82 mg/MJ), zeigt sich auch für die Nicht-CH₄-Org.-C-Emissionen. Auch die Gesamtstaubemissionen stiegen von Tag 6 (35 mg/MJ) zu Tag 11 (57 mg/MJ) deutlich an, fielen durch die Reinigung aber lediglich auf 53 mg/MJ zurück. Der Vergleich mit den Nicht-CH₄-Org.-C-Emissionen legt den Verdacht nahe, dass die Zunahme der Gesamtstaubemissionen im direkten Zusammenhang mit der Abnahme der Aktivität für die Umsetzung der organischen Kohlenwasserstoffen steht. Die Gesamtstaubemissionen mit Katalysator an Tag 11 und 12 in Abbildung 26 sind hinsichtlich der Größenordnung vergleichbar mit denen der Schaumkeramik ohne katalytische Beschichtung in Abbildung 21. Dies würde auch für die Annahme sprechen, dass die katalytisch beschichtete Schaumkeramik zwar einen Einfluss auf die Staubemissionen hat (durch Umsetzung von organischen Kohlenwasserstoffen), jedoch der Einbau einer Schaumkeramik in den Abgasweg gleichzeitig einen negativen primären Einfluss auf die Gesamtstaubemissionen besitzt, verglichen mit einem einfachen Einbau wie z. B. dem Dummy-Element (siehe auch 4.2.3). Solange der Katalysator vollständig aktiv ist kommt es vermutlich zu einer Kompensation dieser Effekte. Bei zunehmender Deaktivierung des Katalysators scheint der negative Effekt der Schaumkeramik zu überwiegen, wodurch die Gesamtstaubemission im Vergleich zum Dummy ansteigt.



Abbildung 23: Optimierungsmaßnahmen vor dem Langzeitversuch: Nachrüstung einer Temperatur und Druckmessstelle im Feuerraum und Abdichten der undichten Stellen mit feuerfestem Keramikkleber



Abbildung 24: CO-Emissionen der Langzeitmessung (12 Werktage mit jeweils 8 Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus 3 Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11 dar)



Abbildung 25: Nicht-CH₄-Org.-C Emissionen der Langzeitmessung (12 Werktage mit jeweils 8 Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus 3 Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11 dar)



Abbildung 26: Gesamtstaubemissionen der Langzeitmessung (12 Werktage mit jeweils 8 Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus 3 Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11 dar)

Die Zunahme der CO-, Nicht-CH₄-Org.-C- und Gesamtstaubemissionen bis Tag 11 liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit an der zunehmenden Deaktivierung des Katalysators durch sog. Katalysatorgifte (z. B. Sulfate) im Abgas oder durch die Blockierung der aktiven Zentren des Katalysators durch Ablagerungen wie z. B. durch Ruß [26; 27]. Da die Reinigung mit Druckluft und Bürste zwischen Tag 11 und Tag 12 die Wirkung des Katalysators hinsichtlich der Emissionen nur teilweise wiederherstellt, scheint die Deaktivierung von einer Mischung aus Vergiftung und Ablagerungen auf der Katalysatoroberfläche herzurühren. Das Abdichten der undichten Stellen mit feuerfestem Keramikkleber hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Emissionen des Dummys. Das zeigte ein Vergleich der Emissionen vor und nach der Abdichtung (siehe Abbildung 27 exemplarisch für CO). Für die Unterschiede zwischen den Katalysatormessungen liegen die Messdaten vor und nach dem Abdichten aufgrund der Alterungserscheinungen des Katalysators nicht mit Normalverteilung vor und können daher nicht auf Signifikanz geprüft werden. Da für den Dummy allerdings keine signifikante Verbesserung der CO Emissionen festgestellt werden konnte, können zumindest primärseitige Effekte auf den Katalysator ausgeschlossen werden. Eine erhöhte Alterung des Katalysators könnte jedoch aufgrund der stärkeren Durchströmung mit Abgasen und damit größeren Belastung des katalytischen Materials aufgetreten sein.



Abbildung 27: Vergleich der CO Emissionen von Dummy und Katalysator vor und nach dem Abdichten mit feuerfestem Keramikkleber



Abbildung 28: Druckverluste über den Katalysator und Dummy während des Langzeitversuchs

Der Druckverlust über den Katalysator (Messung des statischen Drucks vor und nach Katalysator) zeigte keine nennenswerte Zunahme während des Langzeittest (Abbildung 28). Der sichere Betrieb an einem Naturzugschornstein scheint mit den niedrigen Druckverlusten zwischen 4,5 und 5,4 Pa in jedem Fall gegeben zu sein. Der Druckverlust bei Verwendung des Dummys lag während der Messungen mit durchschnittlich 2,8 Pa bei ca. der Hälfte des Druckverlustes der Schaumkeramik bzw. des Katalysators. Dies ist ein weiteres Indiz für die bereits aufgestellte Hypothese, dass sich aufgrund der steigenden Viskosität der Gase bei höheren Temperaturen ein unterschiedlich hoher Druckverlust in Schaumkeramiken und Dummy ausbildet der, zu einem Primäreffekt auf die Verbrennung führt.

4.2.5 Zusammenfassende Bewertung (katalytische vs. nicht-katalytische Schaumkeramik

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Verwendung eines nicht-katalytischen Schaumkeramikelements zu keinerlei Verbesserungen hinsichtlich des Emissionsverhaltens verglichen mit dem Referenzfall führt, wobei als Referenzfall die Messung mit Dummy-Element anzusehen ist. Vergleichbare Messungen, bei denen gänzlich auf ein eingebautes Element verzichtet wurde, wurden nicht durchgeführt. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch eine sehr vergleichbar aufgebaute Studie der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg [53]. Der Einsatz eines Dummys ist bei dieser Art von Vergleichen generell empfehlenswert, da bei einfachem Verzicht auf das Einbauteil nicht unterschieden werden kann, ob die gemessenen Änderungen der Emissionen auf das Bauteil oder z. B. auf den geänderten Druckverlust oder die beeinflussten Strömungsverhältnisse zurückzuführen sind. Dies gestaltete sich in diesem Fall selbst mit Einsatz eines Dummy-Elements schwierig.

Der Einsatz einer katalytisch aktiven Schaumkeramik hatte einen positiven Effekt auf die Emissionen an CO und Nicht-CH₄-Org.-C, der allerdings mit der Anzahl an absolvierten Abbränden relativ stark abzunehmen scheint. Diesem Effekt kann teilweise durch regelmäßige Reinigung des Katalysators entgegengewirkt werden. Hier sollten von Seiten der Katalysatorhersteller realistische Angaben gemacht werden. Außerdem könnte das Waschen des Katalysators mit Wasser zu einer höheren Reaktivierung führen, was allerdings im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht wurde. Der möglichen dauerhaften Abnahme der Aktivität des Katalysators durch Katalysatorgifte könnte evtl. durch geänderte Mischungen der zur katalytischen Aktivierung verwendeten Edelmetalle bzw. durch andere aktive Substanzen entgegengewirkt werden. Außerdem sollte in einer Feldmessung über ein oder zwei Heizperioden abgeklärt werden, in wie weit die dauerhafte Deaktivierung des Katalysators vorschreitet und in wie weit sich diese durch Reinigen oder Waschen des Katalysators wiederherstellen lässt, wobei für den Praxiseinsatz ein monatliches Reinigungsintervall noch vertretbar wäre. Bei den derzeitigen hohen Katalysatorpreisen sollte der Katalysator allerdings über mehrere Heizperioden akzeptable Konvertierungsraten aufweisen. Außerdem sollte auch abgeklärt werden, was passiert wenn der Katalysator entgegen der Herstellerempfehlung nicht gereinigt wird. Durch ein Zusetzen der Schaumkeramik mit anorganischen Partikeln könnte eine Blockade im Abgasweg entstehen. Eine Verstopfung der Schaumkeramik mit anorganischen Partikeln (z. B. Ruß) ist dagegen weniger zu befürchten, da während der Abbrände in der Regel Temperaturspitzen von über 700 °C auftreten, wodurch eine Rußablagerung wieder verbrannt werden würde.

4.3 Quantifizierung von Stillstandsverlusten über den Schornstein sowie Bewertung von Minderungsmaßnahmen an Öfen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Quantifizierung der Stillstandsverluste durch Schornstein und Kaminöfen dargestellt. Diese Ergebnisse wurden unter anderem auch auf der 24. European Biomass Conference & Exhibition präsentiert und veröffentlicht [39].

Bei dem Betrieb eines Kaminofens bleibt der Schornsteinzug auch nach Ende der Verbrennung über längere Zeit erhalten. Dies beruht auf der Tatsache, dass sowohl Ofen als auch Schornstein die Wärme speichern und auch nach mehreren Stunden noch an die Außenluft abgeben können. Außerdem bleibt auch nach dem Abkühlen von Ofen und Schornstein immer noch eine Temperaturdifferenz zwischen dem beheizten Wohnraum und der Außentemperatur bestehen, die ausreicht um einen Schornsteinzug während der gesamten Heizperiode zu erzeugen, auch wenn der Kaminofen gar nicht in Betrieb ist [24]. Wenn die Luftzufuhr des Ofens nicht dicht geschlossen wird – wie bei den meisten Kaminöfen üblich – führt dies zwangsläufig zu einem Durchfluss der wärmeren Raumluft durch den Schornstein und damit zu Wärmeverlusten solange der Wohnraum beheizt wird (z. B. durch Zentralheizung).

Zwei Arten von Stillstandsverlusten wurden in dem Projekt "Wood Stove 2020" untersucht: Stillstandsverluste durch den Schornstein ohne Heizbetrieb (kalte Stillstandsverluste) und die Verluste nach dem Ofenbetrieb, d. h. Verluste während des Abkühlens. Für die Versuche wurden die in Abschnitt 4.1.2 beschriebene Messtechnik und der Prüfstandsaufbau am Naturzugschornstein nach Abbildung 5 (rechts) verwendet. Die Bestimmung der Verluste nach dem Ofenbetrieb erfolgte nach der in Abschnitt 4.1.6 beschriebenen Prüfmethode. Außerdem wurden auch die Wetterdaten mittels einer auf dem Grundstück befindlichen Wetterstation aufgezeichnet.

4.3.1 Kalte Stillstandsverluste

Die in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen drei Kaminöfen (A, B und C) wurden jeweils über mehrere Wochen an einem nicht beheizten Naturzugschornstein angeschlossen. Während dieses Zeitraums wurde an mehreren Stellen im Schornstein die Temperatur gemessen. Ebenso wurde der Volumenstrom durch den Kaminofen bzw. Schornstein bestimmt (siehe Abschnitt 4.1.2, Abbildung 5, rechts) und aufgezeichnet. Während des Monitorings wurden bei allen Kaminöfen die möglichen Luftklappeneinstellungen variiert und untersucht.

Abbildung 29 zeigt beispielhaft den Verlauf der Messdatenaufzeichnung während des Monitorings von Kaminofen B (ohne Heizbetrieb), jeweils bei den untersuchten Klappeneinstellungen. Die gemessenen Außentemperaturen lagen dabei durchschnittlich zwischen 0 und 10 °C, die mittlere Innenraumtemperatur bei ca. 22 °C. Die gemessenen Windgeschwindigkeiten lagen zwischen 0 und 5 m/s. Bei der grafischen Auswertung der Messdaten zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit des Schornsteinzugs zur gemessenen Windgeschwindigkeit. Dieser lag fast durchgehend bei mindestens -4 Pa und erreichte bei Windspitzen bis zu -40 Pa.

Der Durchfluss durch den Ofen nimmt durch den vorherrschenden Schornsteinzug und der verwendeten Luftklappeneinstellung ab. Auffallend dabei war, dass der Durchfluss auch bei geschlossener Luftklappe noch durchschnittlich 4,5 m³/h betrug. Dies zeigte sich in ähnlicher Weise auch für die weiteren Öfen (siehe Tabelle 9) und liegt daran, dass die meisten Ofenhersteller aus Sicherheitsgründen momentan einen freien Restquerschnitt von ca. 3 % in der Zuluftklappe beibehalten. Damit soll dem Risiko vorgebeugt werden, dass – wenn beispielsweise Holz nachgelegt wird während der Luftschieber ganz geschlossen ist – sich ein explosives Gasgemisch bilden kann (Verpuffungsgefahr).



Abbildung 29: Grafische Darstellung der Messdaten des Monitoring von Kaminofen B (Messungen ohne Heizbetrieb)

Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der Monitoring-Dauer der untersuchten Öfen sowie die dabei verwendeten Luftklappenstellungen. Diese waren bei den verwendeten Kaminöfen:

Kaminofen A:

66

- 1: Primärluft offen, Sekundärluft offen, Bypass offen
- 2: Primärluft zu, Sekundärluft offen, Bypass offen
- 3: Primärluft zu, Sekundärluft offen, Bypass zu
- 4: Primärluft zu, Sekundärluft zu, Bypass zu

Kaminofen B (Einhandregelung):

- 1: Luftklappe komplett offen
- 2: Einstellung "Heizbetrieb"
- 3: Luftklappe zu

Kaminofen C:

- 1: Primärluft offen, Sekundärluft offen
- 2: Primärluft zu, Sekundärluft offen
- 3: Primärluft zu, Sekundärluft zu

Ofen A		Ofen B		Ofen C	
Luftklappen- einstellung	Dauer [d]	Luftklappen- einstellung	Dauer [d]	Luftklappen- einstellung	Dauer [d]
1	4,0	1	30,1	1	8,8
2	4,2	2	5,0	2	3,1
3	5,8	3	8,6	3	2,5
4	2,8				

Tabelle 8:Messzeiträume der untersuchten Kaminöfen bei der jeweiligen Luftklappeneinstellung

Zur Berechnung der Stillstandsverluste wurden die mittlere Schornsteintemperatur (Mittelwert der gemessenen Temperaturen im Schornstein) und die folgenden Formeln verwendet:

$$\dot{Q}_{schornstein} = \dot{V}_{Luft} \times \bar{\rho}_{Luft} \times \bar{c}_{p_{Luft}} \times (\bar{T}_{schornstein} - T_{amb})$$

$$Q_{Schornstein} = \sum \dot{Q}_{Schornstein} \times \Delta t_{Messung}$$

Wobei:

 $Q_{\text{Schornstein}} = \text{Verlustwärme in kWh},$

 $\dot{Q}_{\text{Schornstein}}$ = Verlustwärmestrom in kW,

 $\Delta t_{\text{Messung}}$ = Zeitintervall der Messdatenerfassung in h,

 \dot{V}_{Luft} = Volumenstrom der Luft im Schornstein in m³/h,

 $\bar{\rho}_{Luft}$ = mittlere Dichte Luft in Abhängigkeit der Temperatur in kg/m³,

 $\bar{c_{p}}_{tuff}$ mittlere spezifische Wärmekapazität Luft in Abhängigkeit der Temperatur in kJ/(kg×K),

 $\bar{T}_{\text{Schornstein}}$ = Mittlere Temperatur im Schornstein in °C und

 T_{amb} = Umgebungstemperatur in °C.

Die Berechnung der Wärmeverluste während der Abkühlphase erfolgte mit denselben Gleichungen.

Während des eher milden Winters 2015 lagen die ermittelten mittleren Wärmeverluste (Tabelle 9) je nach Luftklappeneinstellung zwischen 13,7 und 53,8 kWh/Monat für Kaminofen A, zwischen 19,5 und 40,0 kWh/Monat für Kaminofen B und zwischen 12,0 und 31,7 kWh für Kaminofen C. Im Fall der geschlossenen Luftklappen wiesen also alle 3 untersuchten Kaminöfen vergleichbare Wärmeverluste zwischen 12.0 und 19,5 kWh/Monat auf. In der Klappenstellung für den Nennlastbetrieb (A/3, B/2 und C/2) treten die Unterschiede zwischen den Öfen deutlicher zutage. So wies Kaminofen C mit 15,1 kWh/Monat in diesem Fall die niedrigsten und Kaminofen A mit 49,2 kWh/Monat die höchsten Verluste auf. Dieser Wert ist bezüglich möglicher "kalter Stillstandsverluste" am relevantesten, da es bei manuell betriebenen Kaminöfen wahrscheinlich ist, dass die Luftklappen in dieser Position nach der letzten Ofenbenutzung verbleiben, z. B. um keinen Schwelbrand hervorzurufen.

Tabelle 9:	Mittelwerte aus den Messdaten zu den kalten Stillstandverlusten sowie
	mittlere berechnete monatliche Verluste

Ofen/ Luftklappen- einstellung	Schornstein- zug	Volumen- strom \dot{V}_{air}	$ar{T}_{Schornstein}$	T _{amb}	Q _{Schornstein}	Berechnete monatliche Verluste
	[Pa]	[m³/h]	[°C]	[°C]	[W]	[kWh]
A/1	-4,5	13,9	19,0	2,8	74,7	53,8
A/2	-5,8	11,5	19,4	3,5	60,7	43,7

A/3	-6,0	11,9	21,3	4,2	68,3	49,2	
A/4	-6,2	4,3	21,8	8,4	19,0	13,7	
B/1	-9,7	10,1	21,4	5,0	55,5	40,0	
B/2	-6,8	7,0	20,5	4,4	37,6	27,1	
B/3	-9,6	4,5	20,6	2,5	27,1	19,5	
C/1	n,a,	8,3	20,2	4,3	44,0	31,7	
C/2	n,a,	4,4	21,2	7,1	20,9	15,1	
C/3	n,a,	2,8	21,3	3,2	16,7	12,0	

4.3.2 Verluste während des Abkühlvorgangs nach dem Betrieb des Kaminofens (warme Stillstandverluste)

Zur Ermittlung der Wärmeverluste nach dem Betrieb eines Kaminofens wurden mit Kaminofen A insgesamt 12 Versuche (abwechselnd 6 Versuche mit Luftklappe in der zuletzt während dem Heizbetrieb eingestellten Position (siehe Tabelle 10) und 6 Versuche, bei denen die Luftklappe am Ende des letzten Abbrands geschlossen wurde (siehe Tabelle 11)). Die Bestimmung der Wärmeverluste erfolgte ab dem Erreichen einer O₂-Konzentration von 18 % am Ende des letzten Abbrands bis zu einer Abgastemperatur von 50 °C an der Messstelle nach DIN EN 13240 [12]. Dieser Vorgang dauerte ca. 5 h und der Verlauf ist exemplarisch für beide untersuchten Varianten (Klappen offen und zu) in Abbildung 30 für einen ausgewählten Messdurchgang dargestellt.



Abbildung 30: Vergleich des Abkühlvorgangs von Kaminofen A nach 8 Abbränden bei geöffneten und geschlossenen Zuluftklappen

Betrachtet man den Verlauf des Volumenstroms, so fällt auf, dass bei Verbleib der Luftklappen in der während des Heizbetriebs zuletzt eingestellten Position ein deutlich höherer Volumenstrom (60 – 20 m³/h) durchgehend über den gesamten Abkühlvorgang erhalten bleibt. Werden die Luftklappen zum Ende des letzten Abbrands geschlossen, so fällt der Volumenstrom ab, ehe die gemessene Strömungsgeschwindigkeit unter die Ansprechempfindlichkeit des verwendeten Strömungssensors von 0,2 m/s fällt.

Messparameter	Ein- heit	Luftklappenstellung nach Heizbetrieb "offen" (O1 bis O6))	
		01	O2	O3	O4	O5	O6
Mittlerer Verlustwärmestrom (5 h)	kW	0,6	0,8	1,0	0,9	1,1	1,1
Summe der Wärmeverluste	kWh	2,8	4,0	4,9	4,7	5,6	5,4
Mittlere Außentemperatur (5 h)	°C	6,6	24,3	13,8	16,7	4,8	10,7
Mittlere Schornsteintemperatur (5 h)	°C	62,1	96,3	92,3	88,6	82,5	79,8
Mittlere Schornsteintemperatur wäh- rend des Abkühlvorgangs	°C	64,4	120,9	121,2	110,1	95,7	85,1
Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Schornstein	m/s	0,63	0,8	0,92	1,0	1,09	1,24
Mittlerer Schornsteinzug	Ра	-3,9	-20,3	-23,3	-27,7	-33,1	-42,5
Mittlerer atmosphärischer Druck	mbar	974	978	991	988	970	962

Tabelle 10:Ergebnisse der Messungen während des Abkühlvorgangs nach dem
Ofenbetrieb bei geöffneter Luftklappe (letzte eingestellte Position) (Kami-
nofen A)

Somit ergeben sich für die Versuche mit Luftklappe nach Heizbetrieb ("offen") Wärmeverluste während des Abkühlvorgangs von 2,8 – 5,6 kWh bzw. ein mittlerer Verlustwärmestrom von 0,6 – 1,1 kW.

Werden die Luftklappen am Ende des letzten Abbrands geschlossen (siehe Tabelle 11), lassen sich die Wärmeverluste auf 1,1 – 3,7 kWh bzw. der Verlustwärmestrom auf 0,2 – 0,7 kW minimieren. Allerdings entspricht diese Verlustwärme immer noch einem Brennstoffwert von ca. 0,3 – 0,9 kg lufttrockenem Buchenholz (4,15 kWh/kg bei 15 % Wassergehalt [5]) pro Heizbetrieb bei geschlossenen Luftklappen nach Heizende. Bleiben die Luftklappen nach dem Heizen in der zuletzt eingestellten Position, was als wesentlich wahrscheinlicher anzusehen ist, wären die Verluste mit 0,7 – 1,3 kg lufttrockenem Buchenholz pro Heizbetrieb deutlich höher. Dies entspricht bei durchschnittlich ca.13,8 kg Buchenholz pro Kaminofennutzung (8 Abbrände nach der in Abschnitt 4.1.6 definierten Methode) bis zu 6,5 % der eingesetzten Brennstoffmenge bei am Ende geschlossenen Luftklappen und bis zu 9,4 %, wenn die Luftklappen in der letzten Heizposition verbleiben. Folglich lässt sich durch das Schließen der Klappen bei Kaminofen A der Wärmeverlust nach dem Betrieb um ca. 34 – 61 % senken, jedoch nicht komplett verhindern. Dies könnte in ähnlicher Größenordnung auch für die meisten derzeit auf dem Markt erhältlichen Kaminöfen der Fall sein, die aus Sicherheitsgründen meist einen freien Restquerschnitt der Zuluftklappen aufweisen.

Insgesamt konnte mit den hier dargestellten Versuchen an klimatisch unterschiedlichen Daten eine gute Bandbreite der in der Praxis möglichen Wärmeverluste aufgezeigt werden. Allerdings waren aufgrund des relativ milden Winters 2015 keine Messungen bei Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt möglich, bei denen die Wärmeverluste vermutlich noch etwas höher ausgefallen wären.

Messparameter	Ein- heit	Luftklappenstellung nach Heizbetrieb "zu" (Z1 bis Z6))
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Mittlerer Verlustwärmestrom (5 h)	kW	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,7
Summe der Wärmeverluste	kWh	1,1	1,5	1,5	2,1	1,9	3,7
Mittlere Außentemperatur (5 h)	°C	14,3	14,6	17,4	11,2	17,9	5,3
Mittlere Schornsteintemperatur (5 h)	°C	74,6	85,2	94,5	96,0	93,4	87,1
Mittlere Schornsteintemperatur wäh- rend des Abkühlvorgangs	°C	99,8	106,5	140,8	155,1	132,1	102,2
Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Schornstein	m/s	0,19	0,26	0,2	0,3	0,4	0,58
Mittlerer Schornsteinzug	Ра	-5,3	-6,9	-21,3	-26,3	-29,3	-38,6
Mittlerer atmosphärischer Druck	mbar	984	969	985	994	987	976

Tabelle 11:Ergebnisse der Messungen während des Abkühlvorgangs nach dem
Ofenbetrieb bei geschlossener Luftklappe (Kaminofen A)

Im Wesentlichen hängt die Höhe der Wärmeverluste während des Abkühlvorgangs von der Abgastemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit bzw. dem Abgasmassenstrom ab. Die Abgastemperatur ist dabei stark ofenspezifisch, während der Abgasmassenstrom im Wesentlichen vom Schornsteinzug (d. h. Schornsteinhöhe, Temperaturdifferenz und Windgeschwindigkeiten) und dem Druckverlust oder Strömungswiederstand (Ofen- und Klappenstellung) abhängt. Abbildung 31 zeigt die berechneten Wärmeverluste für alle gemessenen Klappenstellungen ("zu" und "offen") über die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Abgases bzw. der Luft während der Abkühlphase. Für die hier verwendete Feuerung mit einer Nennwärmeleistung von 8 kW ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der Wärmeverluste von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (R²=0,96).



Abbildung 31: Lineare Regression der Wärmeverluste aller gemessenen Klappenstellungen zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Abgas während des Abkühlvorgangs Kaminöfen A

4.3.3 Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung von Stillstandsverlusten

Um eine Abschätzung der Höhe aller jährlich aufsummierten Stillstandsverluste (kalter Schornstein und Abkühlphase nach Ofenbetrieb) geben zu können, wurde eine Hochrechnung auf Grundlage der bereits beschriebenen Messergebnisse durchgeführt. Dabei wurden folgende kalkulatorischen Annahmen getroffen:

- Heizperiode Oktober April → 213 Tage
- Dauer der Wärmeverluste kalter Schornstein an Tagen ohne Heizbetrieb → 24 h
- Dauer der Wärmeverluste kalter Schornstein an Tagen mit Heizbetrieb →15 h (24 h -9 h (4 h Heizbetrieb + 5 h Abkühlphase))
- Mittlerer Verlustwärmestrom kalter Schornstein → 19 W bei Klappe geschlossen,
 68 W bei Klappe in letzter Heizposition
- Mittlere Wärmeverluste während der Abkühlphase → 1,9 kWh bei Klappe geschlossen, 4,6 kWh bei Klappe in letzter Heizposition

Somit ergibt sich für die Hochrechnung der jährlichen Stillstandsverluste des hier untersuchten 8 kW Kaminofen folgender Zusammenhang: Klappe in letzter "Heizposition":

$$Q_{Stillstand} = n_{Heizbetrieb} \times 4.6 \ kWh + \frac{(213 \times 24 \ h - n_{Heizbetrieb} \times 9 \ h) \times 68 \ W}{1000}$$
(4.9)

Klappe nach letztem Abbrand geschlossen:

$$Q_{Stillstand} = n_{Heizbetrieb} \times 1,9 \ kWh + \frac{(213 \times 24 \ h - n_{Heizbetrieb} \times 9 \ h) \times 19 \ W}{1000}$$
(4.10)



Abbildung 32: Extrapolation der Summe der Stillstandsverluste bei kaltem Schornstein und während des Abkühlvorgangs nach dem Heizbetrieb in Abhängigkeit der Tage mit Heizbetrieb

Abbildung 32 zeigt eine grafische Darstellung der beschriebenen Extrapolation der jährlichen Stillstandsverluste für beide untersuchten Luftklappeneinstellungen. Nimmt man eine nach Umfrageergebnissen aus dem EU-Projekt "beReal" [52] realistische typische Anzahl an 4 - 5 Abbränden (ca. 4 h Heizbetrieb) und 100 Heizbetriebe pro Jahr an, so erhält man rund 270 kWh/a Stillstandsverluste bei geschlossenen Luftklappen und rund 750 kWh/a Stillstandsverluste wenn die Luftklappen in der zuletzt eingestellten Position verbleiben. Dies entspricht auf den Brennstoff bezogen jährlichen Verlusten von 65 kg/a bis 181 kg/a je nach Klappenstellung bzw. bei einem durchschnittlichen auf den Energieinhalt bezogenen Scheitholzpreis (33 cm Hartholz gespalten, lufttrocken) von ca. 6,05 ct/kWh [3] einem monetären Verlust von 16,3 € – 45,2 €/a.

Im Rahmen des hier dargestellten Projektes konnte in anderen Arbeitspaketen nachgewiesen werden, dass mittels einer dicht schließenden Klappe am zentralen Verbrennungsluftstutzen die Wärmeverluste während der Abkühlphase auf nahezu Null gesenkt werden können (siehe Abschnitt 4.4). Allerdings sind die Sicherheitsvorschriften für solche Bauteile derzeit nicht normativ festgelegt. Soll ein dicht schließendes Produkt trotzdem eine Zulassung erhalten, muss für den nationalen Markt eine Einzelabnahme über das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) [23] mit einer Gültigkeitsdauer von fünf Jahren erfolgen. Soll das Produkt innerhalb der EU vertrieben werden, so muss die europäische Zulassung (ETA = European Technical Assessment) [9], resultierend in einer CE-Kennzeichnung des Produkts, durchlaufen werden. In beiden Fällen ist die Zulassung sehr zeit- und kostenaufwändig (z. B. bei DIBt mit 2.500 – 30.000 € [10]). Bei den in dieser Branche eher geringen Absatzzahlen, schlagen sich die Kosten für die Zulassung deutlich auf den Verkaufspreis für den Endkunden nieder. So liegt z. B. der Endkundenpreis für die automatisch dicht schließende Zuluftklappe LKF der Firma Kutzner + Weber GmbH bei 867,57 € [37]. Abbildung 33 zeigt die Amortisationsrechnung für diese Luftklappe in Abhängigkeit der Anzahl an Tagen mit Heizbetrieb pro Jahr, unter der Annahme, dass zur primären Wärmebereitstellung ein Öl-Kessel mit einem Jahresnutzungsgrad von 75 % bei einem Ölpreis von 0,66 €/I verwendet wird. Bei 100 Tagen mit Heizbetrieb des Ofens würde sich eine Amortisationszeit von ca. 13,5 Jahren ergeben. Dieser Wert kann sich natürlich erheblich ändern, wenn z. B Lüftungsanlagen verbaut sind, die zu zusätzlichen Verlusten führen. Allerdings zeigt die Rechnung deutlich, dass der Preis der automatischen Luftklappe zur reinen Vermeidung der Stillstandsverluste des Kaminofens sehr zu hoch ist und stellt die Wirtschaftlichkeit der Produkte alleine für diesen Anwendungszweck in Frage.


Abbildung 33: Amortisationszeit der Zuluft Klappe LKF der Firma Kutzner + Weber GmbH in Abhängigkeit der Tage mit Heizbetrieb pro Jahr. (Annahmen: Ofen dient als sekundäre Heizung; primär wird mit Öl Kessel geheizt; Ölpreis = 0,66 €/l; Jahresnutzungsgrad Öl Kessel = 75 %)

Aus diesem Grund wurde innerhalb des Projekts "Wood Stove 2020" von der Firma Kutzner + Weber ein kostengünstiger Prototyp einer Klappe entwickelt, die direkt hinter dem Kaminofen am zentralen Verbrennungsluftstutzen installiert wird (siehe Abschnitt 5.1). Ziel war es, eine automatische Klappe mit einer möglichst einfachen Elektronik zu entwickeln, die bei einem Endkundenpreis von weniger als 250 € liegen sollte. Dabei stellte sich heraus, dass die dazu erforderliche Elektronik immer noch relativ aufwendig sein muss, um z. B. das Ende des 2. Abbrands vom Ende des letzten Abbrands zu unterscheiden, damit ein zu frühes automatisches Schließen vermieden wird. Als vermutlich sinnvollere Alternative könnten sich nachrüstbare, günstige Steuerungen anbieten, deren Elektronik zwar ähnlich komplex ist, aber weitere Vorteile, z. B. bezüglich des Emissionsverhaltens, bieten könnte (siehe Abschnitt 4.4).

4.4 Prüfung und Bewertung von nachrüstbaren Verbrennungsluftsteuerungen und Zugluftbegrenzern

Im Laufe des Projekts wurden insgesamt 3 temperaturgeführte Verbrennungsluftsteuerungen sowie ein elektronischer und ein mechanischer Zugbegrenzer untersucht (siehe Abschnitt 4.1.5, Tabelle 5). Dabei wurden die Verbrennungsluftsteuerungen, wie im Methodenteil bereits beschrieben (siehe Abschnitt 4.1.6), bei einem geregeltem Zug und die Zugbegrenzer an einem Naturzugschornstein getestet. Die drei Verbrennungsluftsteuerungen sind hinsichtlich der verwendeten Komponenten nahezu identisch aufgebaut und arbeiten alle mit einer zentralen Verbrennungsluftklappe, die je nach Abgastemperatur unterschiedlich angesteuert wird. Lediglich die Steuerung der Firma Schmid Feuerungstechnik GmbH & Co. KG (Schmid SMR) schließt die Verbrennungsluftzufuhr nach beenden des Ofenbetriebs komplett ab. Die Luftklappen der Regelungen K + W Compact und TATAREK RT8OS-G-TD weisen beide einen freien Restquerschnitt von ca. 9 % des Rohrquerschnitts der Luftklappe auf. Der mechanische Zugbegrenzer der Firma Kutzner + Weber GmbH besteht aus einer Klappe mit Rückstellgewicht, die sich in Abhängigkeit des Schornsteinzugs öffnet. Diese wurde für die Versuche am Schornsteinsockel installiert, kann aber auch zwischen Kaminofen und Schornstein montiert werden. Der elektronische Zugbegrenzer "Florian" der Firma ATech elektronika d.o.o. wird zwischen dem Verbindungsstück (Ofenrohr zwischen Kaminofen und Schornstein) und dem Schornstein an der Wand montiert. Das Gerät verfügt über einen Ventilator, der während des Anheizens den Zug erhöhen kann, und eine halbmondförmige Abgasklappe, die beim Überschreiten einer gewissen Temperatur den Zug begrenzt.

Die Lufteinstellungen (Primär- und Sekundärluft) am Kaminofen selbst waren bei Verwendung der mechanischen Zugbegrenzer identisch mit denen im manuellen Betrieb. Bei Verwendung der Verbrennungsluftsteuerungen wurden Primär- und Sekundärluft während den ersten zwei Abbränden (Anzünden und Aufheizen) komplett offen gelassen und für die darauffolgenden Abbrände (3 – 8) wurde lediglich die Primärluft geschlossen.

Die Einstellungen der Verbrennungsluftsteuerungen erfolgten in separaten Vorversuchen. Dabei wurden die Steuerungen nach Anleitung des Herstellers angeschlossen, eingestellt und wenn möglich optimal an den Ofen angepasst. Die meisten Möglichkeiten hierfür bot die Steuerung der Firma TATAREK, die dem Benutzer den vollen Zugriff auf alle Steuerungsparameter erlaubt. Die in Abbildung 34 dargestellten Parameter (insbesondere F3, F5, F6/7 und F8) wurden in einem Vorversuch schrittweise optimiert (Einstellung der Temperatur und Klappenstellung am Bedienelement für jeden Punkt). Besonders interessant war hierbei der Punkt F3, bei dem die Luft zu Beginn jedes Abbrandes (kurz nach dem Nachlegen) reduziert werden kann. Dies führte zu einem wesentlich schnelleren Abfallen der gasförmigen Emissionen nach dem Nachlegen und war nur bei dieser Steuerung möglich. Allerdings ist davon auszugehen, dass der "normale" Endnutzer nicht in der Lage ist, die Steuerung selbst aufgrund visueller Beobachtungen optimal einzustellen. Die Einstellmöglichkeiten der anderen beiden Steuerungen beliefen sich lediglich auf die Festlegung des ofenspezifischen Glutphasenbeginns (Nachlegen) und der Abkühltemperatur (Ende des Heizbetriebs). Diese wären in Abbildung 34 vergleichbar mit den Parametern F8 und F9 bzw. "Fstop".



Abbildung 34: Steuerungsparameter der TATAREK Steuerung in grafischer Darstellung [49]

4.4.1 Einfluss der nachrüstbaren Steuerungen und Zugluftbegrenzer auf das Emissionsverhalten

Abbildung 35 zeigt die gasförmigen Emissionen (CO und Org.-C) der drei Verbrennungsluftsteuerungen im Vergleich mit dem manuellen Betrieb bei geregeltem Zug (links) und der zwei Zugbegrenzer im Vergleich mit dem manuellen Betrieb am Naturzugschornstein (rechts). Die gasförmigen Emissionen wurden durch die Verwendung der nachrüstbaren Ofensteuerungen in allen drei Fällen deutlich reduziert. Die besten Ergebnisse, verglichen mit dem manuellen Betrieb, konnten hier mit der TATAREK Steuerung erzielt werden (CO: -56 %; Org.-C: -38 %), gefolgt von Schmid SMR (CO: -54 %; Org.-C: -23 %) und K + W Compact (CO: -40 %; Org.-C: -15 %). Am Naturzugschornstein bewirkte der mechanische Zugbegrenzer im Vergleich zum manuellen Betrieb einen Anstieg der gasförmigen Emissionen (CO: 28 %; Org.-C: 15 %), während der elektronisch Zugbegrenzer zu einer Verringerung der gasförmigen Emissionen führte (CO: -13 %; Org.-C: -27 %). Die Zunahme der Emissionen bei dem mechanischen Zugbegrenzer ist vermutlich damit zu begründen, dass die hier verwendete Einzelraumfeuerstätte bei hohem Schornsteinzug bereits sehr niedrige Emissionen aufweist (siehe auch Abschnitt 4.6). Die Ursache für die Verringerung der gasförmigen Emissionen bei Verwendung des elektronischen Zugbegrenzers (ATEC Florian) kann derzeit noch nicht abschließend geklärt werden.

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Geräten liegt am Einbauort bzw. darin, dass der elektronische Zugbegrenzer eine weitere Umlenkung im Abgasweg darstellt. Diese zusätzliche Durchmischung der Abgase (erhöhte Turbulenz) könnte eventuell einen Einfluss auf die Emissionen gehabt haben [25].



Abbildung 35: Vergleich der gasförmigen Emissionen der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder mit dem Naturzugschornstein

Hauptgrund für die wesentlich niedrigeren gasförmigen Emissionen bei der Verwendung einer Verbrennungsluftsteuerung scheint die gezielte Aufforderung zum Nachlegen von neuem Brennstoff zu einem durch die Steuerung festgelegten Zeitpunkt, in diesen Fällen bei einer bestimmten Temperatur möglichst nahe am Erlöschen der Flamme zu sein (vgl. Abbildung 36). Während beim manuellen Betrieb nach Erreichen eines CO₂-Kriterium (siehe Abschnitt 4.1.6) nachgelegt wurde, fordern die getesteten Ofensteuerungen per Nachlegesignal (optisch oder akustisch) bei einer bestimmten Abgastemperatur zum Nachlegen auf. Die Steuerungen wurden in Vorversuchen so eingestellt, dass das Nachlegesignal möglichst nahe am Erlöschungszeitpunkt der Flamme lag, wie es auch teilweise in den Bedienungsanleitungen der Steuerungen empfohlen wird. Die Temperatur, bei der die Steuerungen zum Nachlegen auffordern, wurde anschließend bei allen Steuerungen gleich gewählt, da es sich um eine ofenspezifische Kenngröße handelt.

Insgesamt führt der Betrieb mit der TATAREK Ofensteuerung zu den niedrigsten gasförmigen Emissionen. Abbildung 36 zeigt beispielhaft die CO-Emissionen sowie die Abgastemperatur des jeweils 4. Abbrands eines Messzyklus bei manuellem Betrieb und bei Betrieb mit der TATAREK Ofensteuerung nach Optimierung der Steuerungsparameter. Vergleicht man die Abbrandkurven, so erkennt man, dass die Kurve bei Verwendung der Steuerung wesentlich kürzer ist (früheres Nachlegen) und der Anstieg der CO-Emissionen nach dem Erlöschen der Flamme verzögert ist.



Abbildung 36: Direkter Vergleich der CO Emissionen und Abgastemperaturen des 4. Abbrands bei manuellem Betrieb mit dem 4. Abbrand bei Verwendung einer Ofensteuerung nach Optimierung der Steuerungsparameter (TA-TAREK 3)



Abbildung 37: Direkter Vergleich der Org.-C Emissionen des 4. Abbrands bei manuellem Betrieb mit einem 4. Abbrand bei Verwendung einer Ofensteuerung nach Optimierung der Steuerungsparameter (TATAREK 3)

Ein weiterer Grund für die besonders niedrigen Emissionen beim Einsatz der TATAREK Steuerung ist vermutlich die darin einprogrammierte kurzzeitige Verringerung der Verbrennungsluft zu Beginn des Abbrands (Parameter F3 in Abbildung 34) sowie die Möglichkeit, anschließend eine Klappenstellung < 100 % Öffnungsweite wählen zu können, was nur bei dieser Steuerung möglich war. Der Effekt dieser beiden Parameter zeigt sich sowohl im Verlauf der CO-Emissionen (Abbildung 36) als auch im Verlauf der Org.-C Emissionen (Abbildung 37). In beiden Darstellungen fällt der Anstieg der CO- bzw. Org.-C-Emissionen v. a. kurz hinter dem Nachlegezeitpunkt, aber auch auf den gesamten Abbrand betrachtet deutlich geringer aus. Durch das Drosseln der Verbrennungsluft wird vermutlich der Anstieg der Brennraum bzw. Abgastemperatur gebremst und somit ein zu schneller Brennstoffumsatz zu Beginn des Abbrands verhindert. Durch das frühere Nachlegen bleibt die Abgastemperatur im Mittel dennoch höher als bei manuellem Betrieb, allerdings reduziert sich dadurch auch die mittlere Abbrandauer um ca. 9 – 10 min (siehe Abbildung 38).



Abbildung 38: Mittlere Abbranddauer der verschiedenen Steuerungen und Zugbegrenzer im Vergleich

Hinsichtlich der partikelförmigen Emissionen (Abbildung 39) zeigt sich im Fall der Schmid SMR Ofensteuerung ein deutlicher Anstieg der partikelförmigen Emissionen gegenüber dem manuellen Betrieb um 56 % und ein geringer Anstieg bei Verwendung der TA-TAREK (22 %) oder der K + W Steuerung (29 %). Der Großteil der partikelförmigen Emissionen von Scheitholzöfen resultiert aus einer unvollständigen Verbrennung, z. B. aufgrund einer beschleunigten Pyrolyse der aufgelegten Brennstoffmenge und dem dadurch entstehenden Luftmangel zu Beginn des Abbrands (sowohl Anzünd-, als auch Nachlegphase) [36]. Gegen Ende eines Abbrands werden dagegen verhältnismäßig wenige Partikel freigesetzt, zumal hier der Großteil des Brennstoffes bereits umgesetzt ist [36]. Da bei Messung der partikelförmigen Emissionen nach VDI 2066-1 [51] die gesammelte Filterbeladung auf den über den Filter abgesaugten Normvolumenstrom (1013 hPa, 0 °C) bezogen wird, würde sich aufgrund der kürzeren Abbranddauer beim Einsatz der Steuerungen somit rechnerisch eine höhere Partikelkonzentration pro Abbrand ergeben, da die Phase mit höheren Emissionen stärker gewichtet wird. Die erhöhten Werte bei Verwendung der Schmid SMR könnten zudem darauf hindeuten, dass aufgrund der komplett dicht schließenden Klappe die Stellwinkel der Klappe teilweise zu gering sind und sich in der Brennkammer Stellen mit lokalem Sauerstoffmangel ausbilden, die zu erhöhten Partikelemissionen aus unvollständiger Verbrennung (z. B. Ruß) führen [40].



Abbildung 39: Vergleich der partikelförmigen Emissionen (PM) der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder Naturzugschornstein

Betrachtet man die durch den Batchbetrieb und die Folge einzelner einander bedingender Abbrände hervorgerufenen großen Schwankungen bei den partikelförmigen Emissionen (siehe min / max in Abbildung 39), kann im Fall der Steuerungen von TATAREK und K + W noch davon ausgegangen werden, dass die Partikelemissionen in einer ähnlicher Größenordnung wie beim manuellen Betrieb liegen. Zu bemerken ist, dass der manuelle Betrieb in den hier dargestellten Versuchen eine optimale Ofenbedienung mit Fachpersonal am Prüfstand darstellt und in der Praxis sicherlich häufig höhere Emissionen durch fehlerhafte Lufteinstellungen auftreten. Solche Fehlbedienungseinflüsse bzw. das Potenzial für ihre Vermeidung durch geeignete automatische Luftsteuerung wurden aber hier nicht überprüft.

4.4.2 Einfluss der nachrüstbaren Steuerungen und Zugbegrenzer auf den Wirkungsgrad von Kaminöfen

Die Wirkungsgrade sowie die einzelnen Wirkungsgradverluste (siehe auch Abschnitt 4.1.6) sind in Abbildung 40 sowie numerisch in Tabelle 12 dargestellt. Die Bezeichnung der "Klappen bzw. Luftklappen in letzter Position" beschreibt dabei die zuletzt im Heizbetrieb eingestellten Klappenpositionen für die Primär- und Sekundärluftzuführung. Dies wäre auch in der Praxis häufig die Einstellung, in der z. B. der Betreiber den Ofen belässt wenn er den Ofen auskühlen lässt (z.B. weil er das Haus verlässt oder zu Bett geht). Eine Steigerung des Wirkungsgrads gegenüber dem manuellen Betrieb war mit allen eingesetzten Steuerungen und Zugbegrenzern möglich. Der höchste Wirkungsgrad wurde am geregelten Zug mit der Steuerung Schmid SMR erreicht (66,3 %) gefolgt von der TATAREK Steuerung (66,1 % und der K+W Compact (63,0 %). Dies entspricht einer maximalen Steigerung des Wirkungsgrades (61,5 %) gegenüber dem manuellen Betrieb um 4,8 %-Punkte. Auffallend ist bei der Steuerung der Firma Schmid, dass mit der dicht schließenden Klappe die Verluste während der Abkühlphase (q_{cool}) von 4,1 % auf 0,7 % gegenüber dem manuellen Betrieb reduziert werden konnten. Hierdurch können auch die Stillstandsverluste bei Nichtbetreiben des Ofens auf ein Minimum reduziert werden (vgl. Abschnitt 4.3).



Abbildung 40: Vergleich der Wirkungsgrade und Verluste der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder Naturzugschornstein. (q_a thermische Verluste während dem Betrieb, q_b chemische Verluste der Verbrennung, q_{cool} Wärmeverluste nach dem Betrieb bzw. während der Abkühlphase, q_c Verluste durch unverbrannte Rückstände vgl. Abschnitt 4.1.6)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verluste durch unverbrannte Rückstände (q_c) zunehmen, je dichter die jeweilige Klappe schließt. So liegen diese Verluste im manuellen Betrieb bei 0,4 %, bei Verwendung der Schmid SMR bei 1,9 %. Es wäre allerdings auch möglich, die verbleibende Holzkohle (diese liegt meist auf dem Rost) bei Kaminöfen mit Steuerung oder Regelung als gespeicherte Energie zu betrachten, die beim nächsten Anzündvorgang wieder verwendet werden kann. Dies würde den Wirkungsgrad um weitere 1,3 % steigern (unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades bei der Verbrennung der Holzkohle).

Der gemessene Wirkungsgrad im manuellen Betrieb am Naturzug war mit 49,2 % aufgrund des erhöhten Zugs (ca. 24 Pa im Mittel) um 12,3 % niedriger als bei manuellem Betrieb am geregelten Zug. Auch am Naturzug konnte mittels der Zugbegrenzer der Wirkungsgrad erhöht werden. Der Wirkungsgrad konnte dabei mit dem elektronischen Zugbegrenzer ATEC Florian (55,4 %) um 6,2 %, mit dem mechanischen Zugbegrenzer der Firma K+W (59,1 %) um 9,9 % gesteigert werden. Eine Reduzierung der Abkühl- bzw. Stillstandsverluste ist mit dieser Technik kaum möglich da ein komplettes Verschließen des Abgasquerschnittes aus Sicherheitsgründen nicht zulässig ist.

Tabelle 12:Vergleich der Wirkungsgrade und Verluste (jeweils in %) der Verbren-
nungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb
am geregelten Zug oder am Naturzugschornstein

Bezeichnung	q _a	q _b	q _{cool}	q _c	Wirkungsgrad
Manueller Betrieb mit Luftklap- pen in letzter Position	32,4	1,7	4,1	0,4	61,5
TATAREK 3	27,7	0,8	4,2	1,2	66,1
Schmid SMR	30,3	0,8	0,7	1,9	66,3
K+W Compact	30,5	1,3	4,4	0,8	63,0
Manueller Betrieb mit Luftklap- pen in letzter Position	44,5	1,2	4,6	0,5	49,2
Zugbegrenzer mit Luftklappen in letzter Position	35,6	1,2	3,3	0,7	59,1
ATEC Florian	37,8	1,0	5,2	0,7	55,4

4.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbegrenzer

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit nachrüstbaren Verbrennungsluftsteuerungen die gasförmigen Emissionen deutlich reduziert werden können. Bei den partikelförmigen Emissionen kommt es jedoch nicht automatisch zu Verbesserungen, sie können auch bei guter Adaption der Steuerungsparameter an den Ofen leicht erhöht sein, wenn man einen optimalen fachkundigen manuellen Prüfstandsbetrieb zu Grunde legt. Bei nicht ausreichender oder fehlerhafter Einstellung der Steuerung können die Emissionen aber auch deutlich erhöht sein. Daher sollte die Einstellung der Steuerungsparameter ausschließlich von Fachpersonal durchgeführt werden. Außerdem sollte mit dem Schornsteinfeger vor Ort abgeklärt werden, ob dieser eine Montage einer Verbrennungsluftsteuerung zustimmt, da dies eine Veränderung an der Feuerstätte darstellt, wodurch diese ihre CE Kennzeichnung verliert.

84

Der Wirkungsgrad kann mit der richtigen Steuerung deutlich gesteigert und die Stillstandsverluste auf ein Minimum reduziert werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Klappe der Steuerung dicht schließt. Je nach Preis der Steuerungen liegt die Amortisationszeit bei einer realistischen Anzahl von 100 Tagen mit Heizbetrieb pro Jahr, zwischen 6 Jahren (TATAREK wenn Klappe dicht schließend) und 23 Jahren (Schmid SMR) (Abbildung 41). Mit der derzeit verbauten nicht dicht schließenden Klappe hätte die TA-TAREK Steuerung allerdings eine Amortisationszeit von ca. 25 Jahren. Dies macht nochmals deutlich wie wichtig es ist, Stillstandsverluste zukünftig konsequenter zu vermeiden.



Abbildung 41: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anzahl an Tagen mit Heizbetrieb pro Jahr, berechnet am Beispiel der Schmid SMR Verbrennungsluftsteuerung.

Die Abnahme hinsichtlich möglicher Sicherheitsrisiken erfolgt wie bereits in Abschnitt 4.3 beschrieben durch das DIBt (national) oder die ETA (Europa). Die Kosten dieser Sicherheitsbewertung werden weiterhin maßgeblich zu dem hohen Verkaufspreis für solche Steuerungen beitragen, solange die Stückzahlen weiterhin niedrig bleiben.

Derzeit wird an einer Norm zum Einsatz von Verbrennungslufteinrichtungen (nachrüstbare Steuerungen, Zugbegrenzer) gearbeitet. Diese soll zunächst als nationale Norm erscheinen und dann auf europäischer Ebene in die Normenfamilie der DIN EN 16510 integriert werden. Hierdurch könnte zukünftig auch der erforderliche Nachweis für Betriebssicherheit solcher nachrüstbaren Steuerungen und Zugbegrenzer deutlich vereinfacht werden. Auch mit Zugbegrenzern kann der Wirkungsgrad gesteigert werden. Allerdings können diese in Abhängigkeit der verwendeten Einzelraumfeuerstätte zu erhöhten Emissionen führen. Dies sollte vor einer Installation eines Zugbegrenzers mit dem Hersteller der Einzelraumfeuerstätte abgeklärt werden.

4.5 Methodenvergleich zur Untersuchung der unverbrannten Rückstände aus Kaminöfen hinsichtlich ihres Energieinhaltes

4.5.1 Vergleich von Analysemethoden für unverbrannte Rückstände

In der derzeit gültigen Norm für die Typenprüfung von Kaminöfen (DIN EN 13240 [12]) sowie der zukünftigen DIN EN16510 [14] werden unverbrannte Rückstände auf dem Rost und im Aschekasten des Ofens als Verluste angenommen. Zur Vereinfachung darf hierfür bei Verwendung von naturbelassenem Holz ein pauschaler Abzug von 0,5 Prozentpunkten des Wirkungsgrads angenommen werden. Für andere Brennstoffe (z.B. Kohlebriketts) erfolgt die Berechnung der Verluste über den Glühverlust der Rückstände:

$$q_c = \frac{100 \times Q_c}{H_{i,f}}, \ Q_c = \frac{335 \times B \times A}{100}$$
 (4.11)

Wobei:

qc Wirkungsgradverluste durch Rückstände in %,

 $Q_{\rm c}$ Wärmeverluste durch unverbrannte Rückstände in kJ/kg,

H_{i,f} Heizwert des Brennstoffs wie verbrannt (feucht) in kJ/kg,

B Glühverlust des Rückstandes in m-% und

A Gesamtmasse der Rückstände bezogen auf die verfeuerte Brennstoffmenge in m-% ist.

Während der Verbrennungsversuche in diesem Projekt wurde über alle 40 Versuchstage der gesamte jeweilige Rückstand eines Versuchstages aus dem Kaminofen entnommen und es wurde der Glühverlust nach DIN EN ISO 18122 bestimmt. Von einer repräsentativen Anzahl an Einzelproben unterschiedlicher Versuchstage (3 für abgesiebte (Fein-)asche, 3 für zurückgebliebene Holzkohle) wurde außerdem die Elementarzusammensetzung sowie der Heizwert bestimmt. Hierbei wurde jeweils der Holzkohleanteil von der Asche durch Siebung mit einem 3,15 mm Maschensieb von Hand getrennt (siehe Abbildung 42 und Abbildung 43.



Abbildung 42: Gesiebte Rückstände nach 8 Abbränden bei manuellem Betrieb. Links: Partikel ≤ 3,15 mm, rechts; Partikel > 3,15 mm



Abbildung 43: Gesiebte Rückstände nach 8 Abbränden mit Steuerung Schmid SMR. Links: Partikel ≤ 3,15 mm, rechts; Partikel > 3,15 mm

Zum Vergleich mit der in der DIN EN 13240 [12] angegebenen Berechnungsmethode wurden die Wirkungsgradverluste durch die Rückstände mittels der Elementarzusammensetzung nach GAUR et al. [29] berechnet:

$$H_{O_{Rückstand}} = 0,3491 \times C + 1,1783 \times H + 0,1005 \times S - 0,0151 \times N - 0,1034 \times O - 0,0211 \times A$$
(4.12)

$$H_{U_{R\ddot{u}ckstand}} = H_{O_{R\ddot{u}ckstand}} \times \left(1 - \frac{WG}{100}\right) - 2,447 \times \frac{WG}{100} - 2,447 \times \frac{H}{100} \times 9,01 \\ \times \left(1 - \frac{WG}{100}\right)$$
(4.13)

$$q_c = \frac{H_{U_{R\ddot{u}ckstand}} \times m_{R\ddot{u}ckstand}}{H_{U_{Brennstoff}} \times m_{Brennstoff}} * 100$$
(4.14)

Wobei:

 $H_{O_{R\ddot{u}ckstand}}$ der Brennwert des Rückstandes in MJ/kg(trocken),

C der Kohlenstoffgehalt in m.-% (trocken),

H der Wasserstoffgehalt in m.-% (trocken),

S der Schwefelgehalt in m.-% (trocken)

N der Stickstoffgehalt in m.-% (trocken),

0 der Sauerstoffgehalt in m.-% (trocken),

A der Aschegehalt in m.-% (trocken),

 $H_{\mathrm{U}_{\mathrm{Rückstand}}}$ der unterer Heizwert des Rückstands in MJ/kg (feucht),

WG der Wassergehalt in m.-% (feucht),

m_{Rückstand} die Masse des gesamten Rückstands in kg (feucht),

 $H_{U_{Brennstoff}}$ der unterer Heizwert des Brennstoffs in MJ/kg (feucht) und

m_{Brennstoff} die Masse des Brennstoffs in kg (feucht) ist.

Zusätzlich wurde am TFZ noch eine vereinfachte Berechnungsmethode aus der Überlegung entwickelt, dass der gewogene Rückstand abzüglich des Aschegehalts des Brennstoffs aus reinem Kohlenstoff besteht:

$$q_{c} = \frac{(m_{R\ddot{u}ckstand} - A * m_{Brennstoff}) * H_{u_{c}}}{m_{Brennstoff} * H_{u_{a}Brennstoff}}$$

(4.15)

Wobei:

 ${\it H}_{\rm u_c}$ der Heizwert des reinen Kohlenstoffs in MJ/kg (trocken) und

A der Aschegehalt des Brennstoffs in % (trocken) ist.

Tabelle 13:Mittlere Ergebnisse der Elementaranalyse und der Heizwertberechnung
nach GAUR et al. sowie der Heizwertbestimmung nach DIN EN ISO
18125

Bestimmung	Einheit	Brennstoff (Buche)	Holzkohle (d.h. Partikel >3,15 mm)	Asche (d.h. Partikel <3,15 mm)
С	m-% (trocken)	48,88	74,85	12,20
Н	m-% (trocken)	6,10	1,45	0,10
Ν	m-% (trocken)	0,09	0,44	0,06
S	m-% (trocken)	0,01	0,08	0,11
CI	m-% (trocken)	0,0100	0,0095	0,0090
Aschegehalt	m-% (trocken)	0,64	9,75	87,54
O (aus Bilanz)	m-% (trocken)	44,37	13,43	0,0
Wassergehalt	m-% (feucht)	10,00	4,51	2,78
Heizwert GAUR et al.	MJ/kg	16,20	24,10	2,53
Heizwert bestimmt	MJ/kg	16,19	27,14	< Nachweis- grenze

Die Elementarzusammensetzung des Brennstoffs, der untersuchten Holzkohleproben sowie der bestimmte und der errechnete Heizwert sind in Tabelle 13 aufgelistet. Der Heizwert der abgesiebten Asche konnte im Bombenkaloriemeter aufgrund des zu niedrigen Wertes unterhalb der Nachweisgrenze nicht bestimmt werden. Der mittlere bestimmte Heizwert der Holzkohle liegt um rund 4,1 MJ/kg höher als der nach GAUR et al. berechnete Heizwert.

Abbildung 44 zeigt den grafischen Vergleich der Berechnungsmethoden für die 40 untersuchten Brennstoffe. In Tabelle 14 findet sich die Beschreibung der einzelnen Versuche sowie die jeweiligen Massen an Asche und Holzkohle, die Glühverluste und die eingesetzte Brennstoffmasse. Vergleicht man die grafische Darstellung der Ergebnisse zu den Berechnungsmethoden so fällt auf, dass die Berechnung der Rückstandsverluste nach DIN Norm (q_c DIN 13240) wesentlich höher ausfällt als die Werte mittels Heizwertbestimmung (q_c H_u). Die nach GAUR et al. (q_c Gaur) oder der vereinfachte TFZ Methode (q_c TFZ) ermittelten Werte liegen dafür sehr nahe an den Werten, die durch die Heizwertbestimmung der Holzkohle ermittelt wurden. Außerdem fällt auf, dass die Verluste durch unverbrannte Rückstände in den meisten der hier untersuchten Fälle sehr deutlich über dem in der Norm für naturbelassenes Holz vorgeschlagenem Wert von 0,5 % liegen. Für die Bestimmung mittels Glühverlust (DIN 13240 und DIN EN ISO 18122) trifft dies sogar in jedem Fall zu. Ein Grund für die höheren Werte durch die Glühverlustbestimmung könnte sein, dass die zur Berechnung verwendete Formel (4.11) noch aus der Norm für Dauerbrandöfen mit Kohle als Brennstoff (DIN 18880-1 [11] von 1991) stammt und für Holzbrennstoffe daher nicht geeignet zu seien scheint.



Abbildung 44: Grafischer Vergleich der Berechnungsmethoden für die Verluste aus unvollständig verbrannten Rückständen. Die gestrichelte Linie bei 0,5 % zeigt den nach DIN EN 13240 pauschal abziehbaren Wert für naturbelassenes Holz.

Vergleicht man die Menge an anfallender Holzkohle in Tabelle 14, so fällt deutlich auf, dass bei Verwendung einer Verbrennungsluftsteuerung und vor allem bei einer dicht schließenden Klappe die Menge der Holzkohle am Ende eines Heizzyklus deutlich zunimmt. Im Fall der dicht schließenden Schmid SMR Steuerung (vgl. Abschnitt 4.4, Versuch Nr. 8 – 15) nimmt die Holzkohle sogar um ca. 330 % verglichen mit dem manuellen Betrieb zu. Im manuellen Betrieb gibt es dagegen kaum einen Unterschied zwischen der geschlossenen Klappenstellung und der Stellung in der letzten Heizposition (Tabelle 14: Nr. 23 und 24).

Versuch Nr.	Bezeichnung Versuch	Asche [g]	Holzkohle [g]	Glühverlust [%]	Brennstoff [kg]
1	TATAREK Ofensteuerung	60	114	85,6	13,6
2	TATAREK Ofensteuerung	66	78	93,5	13,5
3	TATAREK Ofensteuerung	65	93	87,9	13,6
4	TATAREK Ofensteuerung	62	91	100	13,5
5	TATAREK Ofensteuerung	68	118	103,2	13,5
6	TATAREK Ofensteuerung, Wärmeverlustbestimmung	33	51	91,8	6,1
7	TATAREK Ofensteuerung, Überlast	63	111	83,8	15,7
8	Schmid SMR Ofensteuerung	65	125	83,8	13,5
9	Schmid SMR Ofensteuerung	63	167	129,1	13,8
10	Schmid SMR Ofensteuerung	65	163	96,1	13,5
11	Schmid SMR Ofensteuerung	65	139	91,6	13,6
12	Schmid SMR Ofensteuerung	66	202	57,3	13,8
13	Schmid SMR Ofensteuerung	66	130	91	13,7
14	Schmid SMR Ofensteuerung –Wärmeverlustbestimmung	67	81	91	6,2
15	Schmid SMR Ofensteuerung-Überlast	81	138	91,6	16,1
16	K&W Compact Ofensteuerung	73	71	88,7	13,8
17	K&W Compact Ofensteuerung	65	67	80	13,6
18	K&W Compact Ofensteuerung	62	66	77,8	13,8
19	K&W Compact Ofensteuerung/Löcher zugeklebt	60	154	94,1	13,6
20	K&W Compact Ofensteuerung, Wärmeverlustbestimmung	30	24	86,8	6
21	K&W Compact Ofensteuerung, Überlast	73	122	88,8	16,4
22	K+W automatische Zuluftklappe Nachlegen nach CO2 Kriterium	28	83	100,9	6,3
23	Naturzug, Luftklappen in letzte Stellung verblieben	51	30	56,7	13,5
24	Naturzug, Luftklappen geschlossen	69	45	80,3	13,7

Tabelle 14:Tabellarischer Vergleich der Asche und Holzkohlemengen nach den Ver-
suchen sowie der Glühverluste und der eingesetzten Brennstoffmenge

25	Naturzug, Luftklappen in letzte Stellung verblieben		48	84	13,6
26	Naturzug, Wärmeverlustmessung	33	15	85,9	6,4
27	Naturzug, Überlast	75	53	67,2	15,9
28	Naturzug mit K+W Zugbegrenzer	68	43	89,5	13,6
29	Naturzug mit K+W Zugbegrenzer	52	63	75,6	13,9
30	Naturzug mit K+W Zugbegrenzer	64	72	91,4	13,7
31	Naturzug mit K+W Zugbegrenzer/ Wärmeverlustmessung	28	23	68	6,4
32	Naturzug mit K+W Zugbegrenzer - Überlast	88	55	90,6	15,8
33	Naturzug mit K+W Zugbegrenzer und Außenluftanschluss	64	62	88,7	13,8
34	Naturzug mit Atec Florian Steuerung,	62	68	86,2	14,1
35	Naturzug mit Atec Florian Steuerung,	74	79	92,4	13,7
36	Naturzug mit Atec Florian Steuerung,	32	18	95,3	13,4
37	Naturzug mit Atec Florian Steuerung, Wärmeverluste	81	67	83,6	6,2
38	Naturzug mit Atec Florian Steuerung, Überlast	64	62	89,6	16,4
39	ohne Steuerung, Überlast	65	68	68,7	16,6
40	Wärmeverlustbestimmung, Luftklappen in letzte Stellung	33	14	80,3	6,3

4.5.2 Zusammenfassende Bewertung der Methoden zur Rückstandsbewertung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der in der DIN EN 13240 [12] sowie der zukünftigen DIN EN 16510 [14] für die Rückstände bei Verwendung von naturbelassenem Holz anzusetzende pauschale Abzug in Höhe von 0,5 % Wirkungsgradverlust für moderne Kaminöfen mit hohen Anforderungen an die Dichtigkeit nicht mehr zeitgemäß erscheinen. Allerdings könnte dieser Wert mit der hier ermittelten vereinfachten Methode durch simples Wiegen der Rückstände ausreichend genau quantifiziert werden. Des Weiteren ist zu hinterfragen, inwiefern die bei automatisch gesteuerten Kaminöfen mit dicht schließender Luftklappe anfallenden Mengen an Holzkohle im Rückstand (Tabelle 14 und Abbildung 44) noch als Verlust zu bewerten sind bzw. vom Benutzer entsorgt werden sollten. Hier wäre es sinnvoller, wenn der Hersteller in der Bedienungsanleitung bzw. dem "Quick User Guide" eine Anleitung zum Anheizen mit der verbliebenen Holzkohle geben würde. Diese könnte dann als gespeicherte Energie gewertet werden und

92

beispielsweise mit dem Wirkungsgrad des Ofens berechnet werden. Somit würde der darstellbare Wirkungsgrad nochmals etwas ansteigen (vgl. Vorschlag in Formel 4.16).

$$\eta = 100 - (q_a + q_b - q_c * \eta_{charcoal} + q_{cool})$$
(4.16)

4.6 **Einflusses des Förderdrucks auf Wirkungsgrad und Emissionen**

Zusätzlich zur Untersuchung der Zugbegrenzer (siehe Abschnitt 4.4) wurden Ergebnisse aus vorherigen Projekten (beReal [41], TFZ Bericht 36 [31]) zum Einfluss des Förderdrucks auf den Wirkungsgrad und die Schadstoffemissionen zusammengefasst. Dabei wurden die gasförmigen und partikelförmigen Emissionen sowie der Wirkungsgrad von drei verschiedenen Kaminöfen bei Förderdrücken von 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa gemessen.

4.6.1 Einfluss des Förderdrucks auf Emissionen

Hinsichtlich der CO-Emissionen (Abbildung 45) ist je nach Feuerung ein gegenläufiger Trend zu beobachten. So steigen beispielsweise bei Ofen A die CO-Emissionen mit steigendem Förderdruck von 1.597 mg/Nm³ bis auf 2.103 mg/Nm³ um rund 24 % an, während sie bei Ofen B (- 25 %) und C (- 45 %) mit steigendem Zug abnehmen. Hierdurch lassen sich die unter Abschnitt 4.4 beobachteten Ergebnisse am Naturzug (ca. 24 Pa) zum Teil erklären, die für den verwendeten Ofen ebenfalls niedriger lagen, als beim geregelten Zug bei 12 Pa.



Abbildung 45: Vergleich der CO Emissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [41]).

Die Org.-C-Emissionen (Abbildung 46) verhalten sich für die hier untersuchten Kaminöfen analog zu den CO-Emissionen und sind demnach ebenfalls als sehr ofenspezifisch zu bewerten.



Abbildung 46: Vergleich der Org.-C-Emissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [41]).



Abbildung 47: Vergleich der partikelförmigen Emissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [41]).

Für die partikelförmigen Emissionen (Abbildung 47) lässt sich für die Öfen A und B kein eindeutiger Trend erkennen, wobei sich die partikelförmigen Emissionen bei Kaminofen A mit steigendem Förderdruck etwas zu erhöhen scheinen (ca. 6 %). Bei Ofen C hingegen führt ein höherer Förderdruck zu einem Rückgang der partikelförmigen Emissionen von 124 mg/Nm³ auf 109 mg/Nm³ um rund 12 %.

4.6.2 Einfluss des Förderdrucks auf den Wirkungsgrad

Für den Wirkungsgrad (Abbildung 48) zeigt sich für alle untersuchten Öfen ein einheitlicher Trend. Der Wirkungsgrad nimmt mit steigendem Förderduck deutlich ab (Ofen A -17 %; Ofen B -15 %; Ofen C -8 %). Der Wirkungsgrad scheint daher der einzige hier untersuchte, nicht ofenspezifisch vom Förderdruck abhängige Parameter zu sein. Analog nahm auch in den Versuchen in Abschnitt 4.4.2 der Wirkungsgrad bei der Messung am Naturzug im Vergleich zu der Messung am geregelten Zug ab.



Abbildung 48: Vergleich des Wirkungsgrades gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa

5 Teilvorhaben 2: Aufgabenschwerpunkte der Kutzner + Weber GmbH

5.1 Entwicklung einer automatischen Abgasklappe zur Minimierung von Stillstandsverlusten

5.1.1 Stand der Technik

Automatische Verbrennungsluftklappe (Doppelklappe) Moderne, dichte Gebäude benötigen für den sicheren Betrieb von Holzfeuerungen eine ausreichend große Zuluftöffnung für die Verbrennungsluft. Da diese unverschlossen zu erheblichen Wärmeverlusten führt, hat Kutzner und Weber eine selbsttätig schließende Luftklappe entwickelt und zugelassen (siehe Abbildung 49), welche die Wärmeverluste minimiert.



Abbildung 49: Automatische Verbrennungsluftklappe für Pelletöfen und handbeschickte Holzfeuerungen

Diese Doppelklappe wird in eine Außenwand eingesetzt und dichtet die Gebäudehülle über zwei in Reihe geschaltete Absperrklappen ab. Zwischen den Klappen wird zur Wärmedämmung ein Luftpolster eingeschlossen. Wärmeverluste und Bildung von Kondensat werden so minimiert.

Je nach Art der Feuerung öffnet die Klappe durch Anforderung über einen Taster (bei Handbeschickung) oder selbsttätig (bei Pelletfeuerungen). Über einen Abgastemperaturwächter wird die Klappe so lange offen gehalten, bis die Temperatur im Abgas wieder unter 45 °C fällt. Zur Überbrückung des Anheizvorgangs sowie aus Sicherheitsgründen hält ein Timer die Klappe in jedem Fall für 30 Minuten offen (Abbildung 50).



Abbranddauer



Dass die Versorgung mit Verbrennungsluft sichergestellt ist, wird über eine Reihe von Sicherheitseinrichtungen erzielt:

- Der Klappenantrieb ist mit einem Federrückzug (stromlos offen) ausgestattet. So ist auch bei Ausfall der Hilfsenergie eine Luftversorgung gesichert.
- Ein Abgastemperaturwächter hält die Klappe solange offen (stromlos), bis der Ofen abgekühlt ist. Er gilt als kalt bzw. das Feuer als erloschen wenn die Abgastemperatur 45 °C unterschreitet. Ein Timer hält darüber hinaus die Klappe für weitere 30 Minuten offen.
- Dieses Konzept wurde von einer unabhängigen Stelle geprüft, eine Zulassung vom Deutschen Institut für Bautechnik wurde erteilt.

Abgasklappen bei Scheitholzfeuerungen, Bewertung hinsichtlich Energieeinsparvermögen Bei Scheitholzöfen werden von einigen Herstellern Drosselklappen im Abgas eingesetzt. Diese müssen nach DIN EN 13240 einen Restquerschnitt aufweisen um zu jeder Zeit eine sichere Abfuhr der Abgase sicherzustellen. Diese Klappen sind zudem handbetätigt, ein Abgasaustritt nach dem Schließen der Drossel würde wahrscheinlich vom Betreiber bemerkt. Ein Vergleich mit automatisch betätigten Klappen ist daher nicht vollständig gegeben.

Durch diesen Restquerschnitt können die Abgasklappen die unerwünschte Durchströmung der Feuerungen während des Stillstandes nur reduzieren und eignen sich daher nicht für eine wirksame Reduktion der Wärmeverluste durch das Abgassystem (siehe Abschnitt 4.3).

Thermische Abgasklappen bei atmosphärischen Gaskesseln. Bei atmosphärischen Gasfeuerungen mit Strömungssicherung werden häufig thermische Abgasklappen eingesetzt um die Stillstandsverluste zu minimieren.

Diese benötigen ebenfalls einen Restquerschnitt um vom Abgas initial erwärmt zu werden. Durch Bimetallfedern öffnen sich die Klappensegel bei Beaufschlagung mit dem Abgas und erlauben eine sichere Abfuhr während des Betriebes der Feuerung. Beim Abkühlen schließen sie wieder selbsttätig und reduzieren so Wärmeverluste durch die Begrenzung unerwünschter Durchströmung.

Die Wirksamkeit dieser Einrichtungen wurde über ein Rechenmodell nachgewiesen, sie können trotz des Restquerschnittes die Verluste um bis zu 90% reduzieren und amortisieren sich durch die niedrigen Anschaffungskosten in wenigen Jahren [24]. Durch die Bimetallfedern können nur sehr geringe Kräfte erzeugt werden, eine Übertragbarkeit auf das staubbeladene Abgas von Holzfeuerungen ist daher als schwierig zu bewerten.

Motorische betätigte Abgasklappen. Dicht schließende motorisch betätigte Abgasklappen sind für Öl- und Gasgeräte Standard und würden technologisch auch für Holzfeuerungen zur Verfügung stehen.

So wird bei diesen Produkten durch einen Antrieb mit Federrückzug (stromlos offen), eine Abfrage der Klappenstellung durch Endlagenschalter und Freigabe der Feuerung nur bei geöffneter Klappe hinsichtlich der Abgasabfuhr ausreichend Sicherheit geschaffen.

Da handbeschickte Holzfeuerungen im Betrieb bei Störung der Abgasklappe im Gegensatz zu Gasfeuerungen nicht einfach abgeschaltet werden können, müsste die Abfuhr der entstehenden Abgase durch die ausreichende Eigensicherheit der Abgasklappe selbst in jedem Fall sichergestellt werden. Wäre dies nicht der Fall, würde durch unkontrolliert in den Aufstellraum austretendes Abgas Lebensgefahr bestehen.

Die motorischen Abgasklappen für automatische Öl- und Gasfeuerungen sind daher nicht ohne weiteres auf Holzfeuerungen übertragbar.

Insbesondere gestaltet sich die Frage nach dem Zeitpunkt, an dem die Klappe am Ende einer Betriebsphase sicher geschlossen werden kann, als schwierig. Hier besteht weiter die Aufgabe, ein geeignetes Kriterium zu finden und die dazu passende Sensorik redundant auszulegen.

Dieser Zeitpunkt ist für die Wirksamkeit der Absperreinrichtung hinsichtlich der Energieeinsparung von besonderer Bedeutung. Unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten sollte die Klappe möglichst lange offen bleiben, aus energetischer Sicht möglichst früh schließen. Schließt die Abgasklappe zu früh oder ungeplant während des Leistungsbrandes, wäre ein Austritt der Abgase in den Aufstellraum die Folge. Ebenso können sich zündfähige Gasgemische im Brennraum ansammeln und es besteht die Gefahr der Verpuffung beim Öffnen der Brennraumtüre.

5.1.2 Prototyp der temperaturgesteuerten motorischen Zuluftklappe

Hinsichtlich der Sicherheit weist eine Absperrung der Verbrennungsluft in Verbindung mit einer dichten Feuerstätte zur Unterbindung des Wärmestroms deutliche Vorteile auf. Ein zu frühes Schließen der Zuluft z.B. während noch eine geringe Menge an Restglut vorhanden ist, wäre sicherheitstechnisch unkritisch da der Ofen durch den Kaminzug im Unterdruck bleibt und somit ein Ausströmen der Abgase in den Aufstellraum nicht möglich ist.

Ein zu frühes Schließen während der Hauptabbrandphase hingegen, könnte bei Öffnen der Feuerraumtüre zu gefährlichen Verpuffungen führen und muss durch geeignete Sensorik und Schaltkriterien verhindert werden.



Abbildung 51: Prototyp, Verbrennungsluftklappe mit einstellbarem Schaltpunkt

Diese Funktion wird bereits von der kommerziell verfügbaren Doppelklappe von K+W erfüllt, ausreichend Sicherheit wird durch einen Antrieb mit Federrückzug (Stromlos offen) zusammen mit einem eigensicheren Abgastemperaturwächter erreicht.

In Fachkreisen (TÜV Süd / DIBT) wird aktuell eine Abgastemperatur < 45 °C als sicheres Schließkriterium eingestuft (Schutz vor Verpuffung durch brennbare Gase z.B. CO). Dabei wird davon ausgegangen, dass entweder das Feuer komplett erloschen ist oder nur mehr sehr geringe Mengen an Restglut vorhanden sind, die nicht mehr in der Lage sind Kohlenstoffmonoxid Konzentrationen in zündfähiger Höhe zu erzeugen.

Zur Untersuchung wurde daher ein einfacher Prototyp mit einstellbarer Schließtemperatur hergestellt.

Um das in Abschnitt 4.3 ermittelte Einsparpotential vollständig auszuschöpfen fehlt bisher ein geeignetes Sicherheitskonzept. Die bisher als sicher betrachtete Schließtemperatur von 45 °C ist deutlich zu niedrig und kann die Verluste nicht reduzieren.

Weiter stehen einem breiten Markteintritt noch vergleichsweise hohe Herstell- bzw. Investitionskosten gegenüber. Bei entsprechender Stückzahl besteht durch Umstellung von Einzelkomponenten auf Platinenbauweise erhebliches Potential zur Kostenreduktion.

5.2 Weiterentwicklung der Ofensteuerung zur selbstadaptierenden Ofensteuerung

5.2.1 Stand der Technik Ofensteuerung Kompakt bei K + W

Abbildung 52 zeigt die nachrüstbare Ofensteuerung Compakt von Kutzner und Weber.



Abbildung 52: Ofensteuerung K + W Compact, Serienprodukt

Sie besteht aus einer Abgasklappe mit Stellantrieb und integrierter Mikroprozessorsteuerung, einem Abgastemperaturfühler und einem Netzadapter. Der Temperaturfühler wird in die Verbindungsleitung hinter dem Abgasstutzen des Ofens montiert, die Zuluftklappe auf den zentralen Verbrennungsstutzen gesteckt. Optional sind noch ein Display zur Anzeige der Abgastemperatur und Klappenstellung sowie ein abgesetzter Starttaster erhältlich. **Funktion Ofensteuerung Kompakt.** Nach einem Startbefehl, welcher beispielsweise mittels Starttaster ausgelöst wird, geht die Abbrandsteuerung Compact sofort in Betrieb. Die Zuluftklappe öffnet sich und der Abgastemperaturfühler übergibt die erfassten Werte an die Steuereinheit. Die Abbrandsteuerung Compact übernimmt damit die Steuerung der Verbrennungsluft der Feuerstätte. Abbildung 53 zeigt schematisch den Temperaturverlauf und die Klappenstellung während eines Abbrandes.



Abbildung 53: Schematischer Verlauf der Abgastemperatur und der Klappenstellung über einen Abbrand

Wird innerhalb einer Stunde keine Temperaturerhöhung (Heizphase) erkannt, signalisiert dies die Steuerung mittels LED und belässt die Zuluftklappe für 60 Minuten bei einer Öffnung von ca. 20 %. Dies dient der Sicherheit und verhindert z.B. bei einem fehlerhaften Anheizen einen Schwelbrand und somit CO-Entstehung und Verpuffungsgefahr beim Öffnen der Feuerraumtüre.

Erreicht die Feuerstätte nach einem Abbrand die sog. Abkühltemperatur, wird ebenfalls die Zuluftklappe für 60 Minuten bei einer Öffnung von ca. 20 % gehalten um evtl. vorhandenes Abgas über den Schornstein entweichen zu lassen. Zusätzlich ist eine 10 %ige Mindestöffnung im Klappensegel (2 Bohrungen) vorhanden.

Erforderliche Einstellungen Ofensteuerung K+W Kompakt. Die Ofensteuerung Kompakt muss bisher durch Einstellung der Glut- und Abkühltemperatur auf den Ofen angepasst werden.

Diese Anpassung ist zum einen zeitaufwändig aber auch fehleranfällig. Ebenso ist sie vergleichsweise unflexibel und kann sich z.B. nicht an schwankende Brennstoffeigenschaften anpassen.

5.2.2 Weiterentwicklung Selbstadaption und Nachlegezeitpunkt

Nachlegezeitpunkt. Aus den Versuchen zur Bewertung der auf dem Markt befindlichen Ofensteuerungen (siehe Abschnitt 4.4.1) ist bekannt, dass die Menge an Restglut bzw. die Brennraumtemperatur einen erheblichen Einfluss auf das Anbrenn- und damit Emissionsverhalten einer Feuerung bei Brennstoffaufgabe haben. Zudem steigen die Emissionen an Kohlenstoffmonoxid gegen Ende eines Abbrandes stark an. Dem Nachlegezeitpunkt kommt hier entsprechend eine besondere Bedeutung zu.

Im Sinne der Emissionsminderung ist es daher naheliegend, den Nachlegezeitpunkt hinsichtlich der Emissionen zu optimieren, anhand harter messtechnisch erfassbarer Feuerungsparameter abzuleiten und dem Betreiber seitens der Steuerung vorzugeben.

Abbildung 54 zeigt die Verläufe der Abgastemperatur TA hintereinander folgender Abbrände ohne Verbrennungsluftsteuerung. Der Mittelwert 2 gibt dabei den Wert an, bei dem zur Berechnung der Abbrand mit der größten Abweichung zum Mittelwert weggelassen wurde und dient der Einschätzung der Statistischen Aussagefähigkeit des Mittelwertes. Die Abweichung beträgt 1,5 %.

Die Versuche wurden an einem Heizeinsatz Fa. Hark Premio mit 11kW Wärmeleistung durchgeführt. Als Nachlegekriterium wurde nach Herstellerangabe das Erlöschen der Flamen (Glutpunkt) verwendet. Aufgelegt wurden jeweils 2 Scheite Buchenholz vergleichbarer Größe (Rinde nur auf einer Seite) mit einer Masse von insgesamt 1,5 kg. Die Position der Zuluftklappe (offen) wurde gemäß Herstellerangaben während der Abbrände nicht verändert.

105



Abbildung 54: Verlauf der Abgastemperaturen verschiedener hintereinander folgender Abbrände ohne Verbrennungsluftsteuerung

Die Abbranddauer variierte dabei im Bereich von ca. 24 min bis knapp 30 min, die Abgastemperatur am Ende der Abbrände schwankte dabei zwischen 175 und 240 °C. Mit einzelnen Ausnahmen war dabei ein Trend zu in der Folge der Abbrände steigenden Temperatur zu erkennen.

Vergleicht man dazu den Restsauerstoffgehalt (siehe Abbildung 55) variierte dieser zwischen 17,5 und 19 Vol.-% Die Menge an Glut zum Ende des Abbrandes war ebenfalls stark unterschiedlich, der Trend ging mit steigender Anzahl von Abbränden zu niedrigerem Restsauerstoffgehalt.



Abbildung 55: Verlauf des Restsauerstoffgehaltes verschiedener hintereinander folgender Abbrände ohne Verbrennungsluftsteuerung

Vergleicht man zum Ende des Abbrandes die momentane Abgastemperatur bei einem gewählten Restsauerstoffgehalt von z.B. 18 Vol.-% fällt auf, dass diese Temperaturen zwischen 213 °C und 228 °C (Ausnahme ein Abbrand 237 °C) wesentlich enger beieinander lagen als beim hier gewählten Nachlegekriterium. Dies legt den Rückschluss nahe, dass die Abgastemperatur unter der Voraussetzung von Luftüberschuss zur Bestimmung des Nachlegezeitpunktes im Vergleich zum Restsauerstoffgehalt geeignet sein könnte.

Jedoch wurden bei diesen Abbränden im Sinne der Reproduzierbarkeit unter Laborbedingungen Brennstoffe gleicher Qualität und Form abgewogen und auf 1,5 kg zurechtgespalten.

Zwar erscheint die Abgastemperatur in dieser Abbrandfolge als ausreichend genaues Nachlegekriterium, jedoch berücksichtigt sie nicht unterschiedliche Brennstoffmengen und Qualitäten. Ebenso ist die Abgastemperatur zum idealen Nachlegezeitpunkt eine Ofenspezifische Größe und hängt auch wesentlich von den Wärmeübertragungseigenschaften des Ofens ab. Dies gilt es bei einer Nachrüstlösung zu berücksichtigen.

5.2.3 Prototyp selbstadaptive Ofensteuerung

Zielsetzung

- Selbstadaption an den Ofen
- Vorgabe eines hinsichtlich Schadstoffemissionen optimierten Nachlegezeitpunktes
- Berücksichtigung unterschiedlicher Brennstoffarten, Mengen und Qualitäten
- Komplett dichtschließende Zuluftklappe
- Vergleichbares Emissionsverhalten mit dem optimalen Betrieb ohne Steuerung

LabVIEW Prototyp

Zur Durchführung der Versuche im Labor wurde mit LabVIEW eine PC-basierte Variante der Ofensteuerung erstellt (siehe Abbildung 56). Diese ermöglicht eine flexible Visualisierung der Mess- und Ausgangssingale sowie eine schnelle Änderung von Rechenalgorithmus und Parametern. Über ein Schnittstellenmodul NI USB 601 (National Instruments) wurden die Messwerte des Temperaturfühlers erfasst und ein Stellungssignal für die Zuluftklappe ausgegeben. Gleichzeitig konnten mit Hilfe des LabVIEW-Programmes alle Messwerte, Rechen- und Stellgrößen einfach aufgezeichnet werden.



Abbildung 56: Abbrandversuch mit LabVIEW-basierter Ofensteuerung, Ansteuerung der Zuluftklappe über PC mit USB-Modul

Die Hardware wurde in zweifacher Ausführung erstellt und ein Satz dem TFZ für die Bewertung analog der auf dem Markt befindlichen Steuerungen (siehe Abschnitt 4.4) zur Verfügung gestellt. Abbildung 57 zeigt die Bedienoberfläche des Programmes.



Abbildung 57: Bedienoberfläche des LabVIEW-basierten Prototypen einer selbstadaptiven Ofensteuerung

Vorgehensweise. Es wurde ein geeignetes, messbares Kriterium gesucht, von welchem die optimale Nachlegetemperatur eines beliebigen Kaminofens abgeleitet werden kann. Zwischen Brennstoffaufgabe und Nachlegezeitpunkt (ehemals Glutpunkt) sollte die Verbrennungsluft analog zur bewährten Ofensteuerung Compakt geführt werden.

Aus einer während des Abbrandes ableitbaren Größe wurde zusammen mit einigen einstellbaren Parametern die Nachlegetemperatur berechnet. Diese Parameter wurden im Labor bei K + W an insgesamt 3 verschiedenen Kaminöfen eingestellt und der Prototyp so zur Bewertung am TFZ vorgestellt.


Abbildung 58: Vergleich der gasförmigen Emissionen (Kohlenstoffmonoxid und organischer Kohlenstoff) des Prototypen mit dem Stand der Technik und dem manuellen Betrieb, Ermittelt auf dem Prüfstand am TFZ

Der Prototyp wurde analog zu den in Abschnitt 4.4 durchgeführten Messreihen bewertet. Es wurden jeweils die gas,- und partikelförmigen Emissionen des Prototypen mit dem Serienstand der K+W Ofensteuerung (K+W Löcher), einem Referenzszenario der Steuerung ohne Restquerschnitt (K + W abgeklebt) und dem manuellen Betrieb verglichen.

Die gasförmigen Emissionen (siehe Abbildung 58) waren dabei um fast 50 % niedriger als beim Handbetrieb und bewegten sich zwischen dem Niveau der Ofensteuerung nach dem Serienstand und der dichtschließenden Ofensteuerung (modifizierter Serienstand).



Abbildung 59: Vergleich der partikelförmigen Emissionen (Gesamtstaub) des Prototypen mit dem Stand der Technik und dem manuellen Betrieb, ermittelt auf dem Prüfstand am TFZ

Bei den partikelförmigen Emissionen (siehe Abbildung 59) lag der Wert von durchschnittlich 60 mg/MJ um 70 % über dem des manuellen Betriebes und um ca. 20 % über dem der Ofensteuerung nach dem Serienstand. Dieses Ergebnis legt nach den Erfahrungen aus Abschnitt 4.4 nahe, dass der Nachlegezeitpunkt eher zu früh angesetzt war. Dadurch ergab sich bei der Brennstoffaufgabe eine vergleichsweise hohe Brennraumtemperatur. Eine schnelle Pyrolyse mit lokalem Sauerstoffmangel und Rußbildung war vermutlich die Folge. Bei dem dadurch verkürzten Abbrand kamen die am Ende ansteigenden gasförmigen Schadstoffe entsprechend weniger zum Tragen.

Die verwendete Führungsgröße reicht demnach nicht aus, um ofenunabhängig den Nachlegezeitpunkt ausreichend genau vorherzusagen.

Optimierung der Vorhersage der Nachlegetemperatur Am Prototypen wurde gegenüber dem modifizierten Serienstand (Restquerschnitt verschlossen) außer dem Nachlegezeitpunkt keinerlei Änderungen vorgenommen. Daher wurde bei der weiteren Optimierung speziell der Nachlegezeitpunkt betrachtet.

In einer Versuchsreihe wurde der Nachlegezeitpunkt über den O2-Gehalt (18 %) bzw. wo nicht möglich über das Erlöschen der Flammen festgelegt. So konnte bei einem Kamineinsatz in einem privaten Haushalt (Schmid Lina) aufgrund der Einbausituation keine Gaszusammensetzung gemessen werden, zum anderen fällt bei sehr dichten Öfen und Einsatz der Ofenregelung die O₂-Konzentration gegen Ende des Abbrandes wieder ab (Drosselung der Luftzufuhr). In diesen Fällen wurde anstelle der O₂-Konzentration das Erlöschen der Flamen verwendet. Es wurden versuche an einem Heizeinsatz Fa. Hark Premio 11 kW, Heizeinsatz Fa. Schmid Lina 7 kW und einem Kaminofen Fa. Hark 8 kW (TFZ) durchgeführt.

Als Brennstoff wurden Buchen-, Eschen- und Fichtenholz in unterschiedlicher Stückigkeit verwendet (Anlieferungszustand), der Wassergehalt lag dabei zwischen 8 und 15 %.

Die Auswertung über alle Öfen ergab keine erkennbare Korrelation zwischen der Abgastemperatur und dem am Prototypen gewählten Kriterium. Jedoch ließ sich innerhalb der Messreihe eines einzelnen Ofens ein Zusammenhang feststellen.

Die Unterschiede zwischen den Öfen konnten ebenfalls in einen Mathematischen Zusammenhang mit weiteren über den Abgastemperaturfühler erfassbaren Informationen gebracht werden. Eine Selbstadaption nach diesem Konzept erscheint somit vielversprechend.

Dieses Ergebnis gilt es durch eine Breitere Datenbasis sowohl innerhalb der Verwendeten Öfen als auch durch Erweiterung auf eine Vielzahl von Feuerungen zu bestätigen. Weiter kann auch der gewählte Nachlegezeitpunkt hinsichtlich Schadstoffemission optimiert werden.

Zusammenfassung

Ziel der hier beschriebenen Arbeitspakete, die am Technologie und Förderzentrum (TFZ) und mit der Firma Kutzner + Weber GmbH (K+W) durchgeführt wurden, war es, bestimmte Einflüsse und Ausstattungsmerkmale für moderne Kaminöfen hinsichtlich ihrer Emissionen, ihres Wirkungsgrades und ihrer Stillstandsverluste unter praxisnahen Bedingungen zu untersuchen und mögliche technische Optimierungsmaßnahmen wie z. B. nachgerüstete Verbrennungsluftsteuerungen oder den Einsatz von Zugbegrenzern, Schaumkeramiken und Katalysatoren zu bewerten. Somit lag das Hauptaugenmerk der Arbeiten von TFZ und K+W auf den nachrüstbaren Lösungsansätzen. In den Ofen integrierte technische Maßnahmen sowie die CFD-basierte Neuentwicklungen von Öfen wurden von weiteren Projektpartnern in Österreich (BIOS, Rika), Schweden (RISE, Nibe) und Dänemark (DTU, HWAM) untersucht. Die Ergebnisse der internationalen Projektpartner sind in den jeweiligen Teilberichten und im Final Report zum Projekt "Wood Stove 2020" [43] wiedergegeben (siehe Anhang).

Schaumkeramiken und Katalysatoren. Die Verwendung eines nicht-katalytischen Schaumkeramikelements führte zu keiner Verbesserungen hinsichtlich des Emissionsverhalten des untersuchten Kaminofens. Das wird inzwischen auch durch eine sehr ähnlich aufgebaute Studie der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg bestätigt [53]. Der Einsatz einer katalytisch aktiven Schaumkeramik hatte dagegen einen positiven Effekt auf die Emissionen, v.a. kam es zu einer CO-Minderung. Dieser Effekt nahm aber mit zunehmender Zahl von Abbränden stark ab. Einer solchen Abnahme kann teilweise durch regelmäßige Reinigung des Katalysators entgegengewirkt werden. Hier sollten von Seiten der Katalysatorhersteller realistische Angaben zum Vorgehen bei der Reinigung und zum Reinigungsintervall gemacht werden. Möglicherweise könnte das Waschen des Katalysators mit Wasser zu einer höheren Reaktivierung führen, was allerdings im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht wurde. Der möglicherweise dauerhaften Abnahme der Aktivität des Katalysators durch Katalysatorgifte könnte evtl. durch andere Mischungen der verwendeten Edelmetalle bzw. durch andere Katalysatorsubstanzen entgegengewirkt werden. Außerdem sollte in Feldmessungen über eine oder mehrere Heizperioden abgeklärt werden, in wie weit die dauerhafte Deaktivierung des Katalysators vorschreitet und in wie weit sich diese durch Reinigen oder Waschen des Katalysators wiederherstellen lässt. Für den Praxiseinsatz könnte ein monatliches Reinigungsintervall noch vertretbar sein. Bei den derzeitigen Katalysatorpreisen sollte ein Katalysator allerdings für mehrere Heizperioden gute Konvertierungsraten bezüglich der Emissionen aufweisen.

Stillstandsverluste. Die im Rahmen dieses Projekts an einem 8 kW Kaminofen quantifizierten Stillstandsverluste (kalter Schornstein + Abkühlverluste nach Betrieb) stellen bei 100 Benutzungsphasen pro Jahr mit ca. 270 kWh/a (bei geschlossener Luftklappe), bzw. mit ca. 750 kWh/a (bei Beibehaltung der Luftklappenstellung des letzten Heizbetriebs) Wärmeverluste in einer nicht unerheblichen Größenordnung dar. Insbesondere bei Neubauten im Niedrigenergiehausbereich (< 25 kWh/(m² a)) aber auch bei allen übrigen Gebäuden, in denen besondere Effizienzvorgaben bestehen, sollten Stillstandsverluste unbedingt vermieden werden. Hierzu wäre es wünschenswert, dass auch bei Kaminöfen mit manueller Lufteinstellung ein vollständiges Abschließen der Luftzufuhr realisierbar ist. Bei automatisch gesteuerten Kaminöfen sollte das vollständige Abschließen der Verbrennungsluft dagegen in jedem Fall erfolgen (zumal es hier am einfachsten und sichersten realisierbar ist), auch wenn bei derzeitigen Brennstoffpreisen die Verluste in Höhe von ca. 40 € jährlich nicht sehr hoch erscheinen. Dabei sind die Steuerungen derzeit noch durch das Deutsche Institut für Bautechnik oder über ein sog. European Technical Assessment zu prüfen. In Zukunft soll es hierfür eine Norm geben an der derzeit gearbeitet wird.

Nachrüstbare Ofensteuerungen. Mit nachrüstbaren Verbrennungsluftsteuerungen können die gasförmigen Emissionen deutlich reduziert werden. Bei den partikelförmigen Emissionen kommt es jedoch nicht automatisch zu Verbesserungen, sie können auch bei guter Adaption der Steuerungsparameter an den Ofen leicht erhöht sein, wenn man einen optimalen fachkundigen manuellen Prüfstandsbetrieb zu Grunde legt. In der Praxis liegen die Emissionen aber erfahrungsgemäß deutlich höher als auf dem Prüfstand [31; 41] was sich allerdings in Prüfstandsmessungen kaum vollständig darstellen lässt, obgleich die hier aufgeführten Messergebnisse auf einer praxisnahen Prüfmethode basieren. Allerdings können nie alle Nutzereinflüsse wie Brennstoffbeschaffenheit, Schornsteinzug, Lufteinstellungen etc. mit guter Reproduzierbarkeit der Messergebnisse abgebildet werden. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Einsatz einer Verbrennungsluftsteuerung in der Praxis den Nutzereinflüss – ausgehend von einem schlechteren Niveau als am Prüfstand – deutlich abmindert und in den meisten Fällen einer Optimierung des Emissionsverhaltens bewirkt.

Bei nicht ausreichender oder fehlerhafter Einstellung der Steuerung können die Emissionen aber auch deutlich erhöht sein. Daher sollte die Einstellung der Steuerungsparameter ausschließlich von Fachpersonal durchgeführt werden. Außerdem sollte mit dem Schornsteinfeger vor Ort abgeklärt werden, ob dieser der Montage einer Verbrennungsluftregelung zustimmt, da dies eine Veränderung an der Feuerstätte darstellt, wodurch diese ihre CE Kennzeichnung verliert.

Der Wirkungsgrad kann mit der richtigen Steuerung deutlich gesteigert und die Stillstandsverluste auf ein Minimum reduziert werden, wenn die Klappe der Steuerung dicht schließt. Je nach Anschaffungspreis für eine solche Steuerung liegt die Amortisationszeit zwischen 6 Jahren (TATAREK wenn Klappe dicht schließend wäre) und 25 Jahren (TA-TATAREK mit einer regulären Klappe), oder auch bei 23 Jahren (Schmid SMR-Steuerung).

Die Abnahme hinsichtlich der Sicherheitsrisiken erfolgt in Deutschland durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) oder durch ein European Technical Assessment (ETA) auf europäischer Ebene. Die Kosten dieser Sicherheitsbewertung werden weiterhin maßgeblich zu dem hohen Verkaufspreis für solche (geprüften) Steuerungen beitragen, solange die verkauften Stückzahlen weiterhin niedrig bleiben. **Zugbegrenzer und Förderdruck.** Hinsichtlich der Emissionen konnte keine eindeutige Empfehlung für oder gegen den Einsatz von Zugbegrenzern ausgesprochen werden, da das Niveau des Schadstoffausstoßes sehr ofenspezifisch ist und es auch zu einer Erhöhung der Emissionen bei einem zu hohen Förderdruck kommen kann. Mit Blick auf den Wirkungsgrad ist ein zu hoher Förderdruck, z. B. durch lange Schornsteine bei hohen Gebäuden, jedoch stets nachteilig, und es ist durchweg empfehlenswert, den Förderdruck auf das geforderte Maß (z. B. bis auf eine Größenordnung von -12 Pa, wie in Typenprüfungen zu realisieren ist) zu senken. Dies kann entweder mit einem Zugbegrenzer automatisch oder mittels einer Abgasklappe im Verbindungsstück zwischen Kaminofen und Schornstein erfolgen.

Verluste durch unverbrannte Rückstände. Der in der DIN EN 13240 [12] sowie der zukünftigen DIN EN 16510 [14] für naturbelassenes Holz pauschal anzusetzende Wirkungsgradverlust von 0,5 % für moderne Kaminöfen mit hohen Anforderungen an die Dichtigkeit erscheint nicht mehr zeitgemäß. Dieser lag in fast allen der 40 durchgeführten Messungen über dem Wert von 0,5 %. Die Verluste an unverbrannten Rückständen können mit der im Rahmen dieses Projekts entwickelten vereinfachten Methode durch simples Wiegen der Rückstände ausreichend genau quantifiziert werden. Des Weiteren ist zu diskutieren, inwiefern bei automatisch gesteuerten Kaminöfen mit dicht schließender Luftklappe die erhöhte Menge an Holzkohle im Rückstand (Tabelle 14 und Abbildung 44) noch als Verlust zu bewerten ist bzw. überhaupt vom Benutzer entsorgt werden sollte. Hier könnte es sinnvoller sein, wenn der Hersteller in der Bedienungsanleitung bzw. dem "Quick User Guide" eine Anleitung zum Anheizen mit der von der vorherigen Benutzung noch verbliebenen Holzkohle geben würde. Diese könnte dann als gespeicherte Energie gewertet werden und beispielsweise mit dem Wirkungsgrad des Ofens berechnet werden. Somit würde der darstellbare Wirkungsgrad nochmals etwas ansteigen.

Schlussfolgerung und Ausblick. Derzeit wird an einer Norm zu den Anforderungen an Verbrennungslufteinrichtungen gearbeitet. Diese soll zunächst als nationale Norm erscheinen und dann auf europäischer Ebene in die DIN EN 16510 integriert werden. Hierdurch könnte auch die Abnahme solcher Steuerungen hinsichtlich der Sicherheit vereinfacht werden. Die CE Kennzeichnung (European Technical Assessment) bzw. die Abnahme durch das Deutsche Institut für Bautechnik sollte für den Vertrieb solcher Steuerungen gesetzlich vorgeschrieben werden.

In wie weit technische Funktionen zukünftiger Öfen zukünftig dazu beitragen können, dass z. B. regionale Verbrennungsverbote vermieden werden oder dass Sonderausstattungen der Öfen (z. B. Steuerungen, Regelungen, Katalysatoren, etc.) hierbei einen Ausnahmetatbestand begründen können, bleibt offen. Eine einfache Nachrüstung einer Verbrennungsluftsteuerung oder eines Katalysators an vorhandene Feuerungen ist in diesem Zusammenhang als wenig zielführend einzustufen, da das Minderungspotential für Staubemissionen zu gering ist. In solchen Fällen müsste eher auf neue Ofenkonzepte mit integrierter Steuerung bzw. Regelung und optimierter Brennraumgeometrie oder auf die Nachrüstung elektrostatischen Partikelabscheidern gesetzt werden. Der Einsatz von Schaumkeramiken ist ebenfalls nicht hilfreich. Zum Teil ist ein solches Angebot für den Verbraucher sogar irreführend, insbesondere wenn die Keramik vom Hersteller als Staubfilter vermarktet wird, obgleich keinerlei vorteilhafte Wirkung nachweisbar ist, sondern sogar Nachteile eintreten können. Erst mit der Möglichkeit, dass derartige Schaumkeramiken durch katalytische Aktivierung eine tatsächliche Schadstoffminderungswirkung bei den gasförmigen Abgasbestandteilen (CO, C-org) haben können, eröffnet sich für solche Einbauten ein gewisses Potenzial. Bis zum Nachweis einer nachhaltig auch im Langzeitbetrieb feststellbaren positiven Wirkung ist es jedoch noch ein weiter Weg.

Quellenverzeichnis

[1] BINDIG, R.; BUTT, S.; HARTMANN, I.; MATTHES, M.; THIEL, C. (2012): Application of Heterogeneous Catalysis in Small-Scale Biomass Combustion Systems, Jg. 2, Nr. 4, S. 223–243

[2] BIOS-BIOENERGY: NEXT GENERATION SMALL-SCALE BIOMASS COMBUS-TION TECHNOLOGIES WITH ULTRA-LOW EMISSIONS – DOWNLOADS. URL: http://www.ultralowdust.eu/index.php?id=237. (Stand: 26.06.2017)

[3] BRUHN KATHRIN: Aktuelle Scheitholzpreise. Technologie- und Förderzentrum. URL: http://www.tfz.bayern.de/festbrennstoffe/energetischenutzung/035134/index.php. (Stand: 14.07.2017)

[4] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB) (2010): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV) vom 26.01.2010. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2010 Teil I Nr. 4, Jg. 2010, S. 38–56

[5] C.A.R.M.E.N. E. V. (2017): Heizwert in Abhängigkeit von Holzart und Wassergehalt. C.A.R.M.E.N. e. V. URL: https://www.carmen-ev.de/biogenefestbrennstoffe/brennstoffe/scheitholz/422-heizwert-in-abhaengigkeit-von-holzart-undwassergehalt. (Stand: 12.07.2017)

[6] CANRÖ, J. (1996): Catalytic abatement of emissions from small-scale combustion of wood, Jg. 75, Nr. 8, S. 959–965

[7] CARNÖ, J.; FERRANDON, M.; BJÖRNBOM, E.; JÄRÅS, S. (1997): Mixed manganese oxide/platinum catalysts for total oxidation of model gas from wood boilers, Jg. 155, Nr. 2, S. 265–281

[8] CHRISTOPH MANDL; BRUNNER, T.; INGWALD OBERNBERGER; ROBERT MACK; HANS HARTMANN; INGMAR SCHÜBLER (2017): Report on catalysts and foam ceramics

[9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (2017): DIBt - Zulassungen - Verfahren Europa.ropa.DeutschesInstitutfürBautechnik.URL:https://www.dibt.de/de/Zulassungen/ETA.html. (Stand: 12.07.2017)

[10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (2017): DIBt - Kosten. Deutsches Institut für Bautechnik. URL: https://www.dibt.de/de/Zulassungen/ETA-Kosten.html. (Stand: 13.07.2017)

[11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (1991): DIN 18880-1: Dauerbrandherde für feste Brennstoffe - Verfeuerung von Kohleprodukten - Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung vom 1991. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 12 Seiten

[12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2005): DIN EN 13240: Raumheizer für feste Brennstoffe vom 2005. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 82 Seiten

[13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2009): Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe - Emissionsprüfverfahren (CEN/TS 15883:2009) vom 2009. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 27 Seiten

[14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2013): DIN EN 16510-1 (Entwurf): Häusliche Heizgeräte für feste Brennstoffe - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren vom 2013. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 145 Seiten

[15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2014): DIN IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik vom 2014. Berlin: Beuth Verlag GmbH

[16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16948: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff vom 2015. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 18 Seiten

[17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16967: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung von Hauptelementen - AI, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti (ISO 16967:2015); vom 2015. Berlin: Beuth Verlag GmbH

[18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16968: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung von Spurenelementen vom 2015. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 16 Seiten

[19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16994: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor vom 2015. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 20 Seiten

[20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18122: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes vom 2015. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 14 Seiten

[21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18134: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung - Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren vom 2015. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 12 Seiten

[22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 14780: Biogene Festbrennstoffe – Verfahren zur Probenherstellung vom 2017. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 22 Seiten

[23] DIBT (2017): DIBt - Ablauf. URL: https://www.dibt.de/de/Zulassungen/abZ-Ablauf.html. (Stand: 12.07.2017)

[24] DIPL.- ING. HERMANN KUHRMANN; PROF. DR.- ING. RUDOLF RAWE (2004): Energieverluste von Gebäuden infolge Luftströmungen durch Abgasanlagen. Einsparungen durch Abgasklappen. Diplomarbeit. Gelsenkirchen. Fachhochschule Gelsenkirchen [25] DR.-ING ALEYSA M.; PROF. DR. LEISTNER P.: Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionesverhaltens in Biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen durch den Einsatz spezieller Einbauten, Jg. 2016

[26] FERRANDON, M.; BERG, M.; BJÖRNBOM, E. (1999): Thermal stability of metalsupported catalysts for reduction of cold-start emissions in a wood-fired domestic boiler, Jg. 53, Nr. 4, S. 647–659

[27] FERRANDON, M.; BJÖRNBOM, E. (1999): Deactivation in a wood-stove of catalysts for total oxidation: Catalyst deactivation 1999, Proceedings of the 8th International Symposium. Studies in Surface Science and Catalysis: Elsevier, S. 423–426, ISBN 9780444502131

[28] futurebiotec. URL: http://futurebiotec.bioenergy2020.eu/content/cont/overview. (Stand: 26.06.2017)

[29] GAUR, S.; REED, T. B. (op. 1998): Thermal data for natural and synthetic fuels. New York, Basel, Hong Kong: Marcel Dekker, 1 vol. (XV-259, ISBN 9780824700706

[30] (2013, 2013): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. [Leitfaden]. Bioenergie.fnr.de.
3. vollst. überarb. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 192 S, ISBN 9783000110412

[31] HARTMANN, H.; SCHÖN, C. (2014): Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen. Berichte aus dem TFZ, Jg. 36. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 173 S. Seiten

[32] HARTMANN, H.; SCHÖN, C.; TUROWSKI, P. (2015): Richtig heizen. Der Betrieb von Kaminöfen. TFZ-Wissen, Jg. 1. Straubing: TFZ, 31 S. Seiten

[33] INGWALD OBERNBERGER; CHRISTOPH MANDL (2017): Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM). Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "Woodstoves2020" - Development of Next Generation and Clean Wood Stoves. Graz, 21 Seiten

[34] INGWALD OBERNBERGER; CHRISTOPH MANDL; HANS HARTMANN; ROBERT MACK; INGMAR SCHÜBLER; JOHAN FURBORG; JYTTE BOLL ILLERUP; VOLZ, F. (2017): Guidelines for automated control systems for stoves. Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "Woodstoves2020" – Development of Next Generation and Clean Wood Stoves. Graz, 28 Seiten

[35] INGWALD OBERNBERGER; HANS HARTMANN; CHRISTOPH MANDL; ROBERT MACK; VOLZ, F.; JOHAN FURBORG; INGMAR SCHÜßLER (2017): Guidelines for Low Emission and High Efficiency Stove Concepts. Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "Woodstoves2020" - Development of Next Generation and Clean Wood Stoves. Straubing, 33 Seiten [36] KONSTA KULMALA (2014): Particle and gaseous emissions from modern masonry heater. Master of Science thesis. Finland. University of Eastern Finland, 59 Seiten

[37] KUTZNER + WEBER GMBH: Komponenten für die Abgas- und Heizungstechnik

[38] MACK, R.; HARTMANN, H. (2016): Performance of Catalytic and Non-Catalytic Foam Ceramic Elements in Log Wood Stoves: ETA-Florence Renewable Energies

[39] MACK, R.; HARTMANN, H. (2016): Standing Losses via Chimney when Using Log Wood Stoves: ETA-Florence Renewable Energies

[40] NUSSBAUMER, T.; LAUBER, A. (2010): Formation Mechanisms and Physical Properties of Particles from Wood Combustion for Design and Operation of Electrostatic Precipitators: ETA-Florence Renewable Energies

[41] REICHERT, G.; HARTMANN, H.; HASLINGER, W.; OEHLER, H.; MACK, R.; SCHMIDL, C.; SCHÖN, C.; SCHWABL, M.; STRESSLER, H.; STURMLECHNER, R.; HOCHENAUER, C. (2017): Effect of draught conditions and ignition technique on combustion performance of firewood roomheaters, Jg. 105, S. 547–560

[42] REICHERT, G.; HARTMANN, H.; HASLINGER, W.; OEHLER, H.; PELZ, S.; SCHMIDL, C.; SCHWABL, M.; STRESSLER, H.; STURMLECHNER, R.; WOEHLER, M.; HOCHENAUER, C. (2016): beReal - Development of a New Test Method for Firewood Roomheaters Reflecting Real Life Operation: ETA-Florence Renewable Energies

[43] ROBERT MACK; HANS HARTMANN; CHRISTOPH MANDL; INGWALD OBERNBERGER; INGMAR SCHÜßLER; FLORIAN VOLZ; JOHAN FURBORG; JYTTE ILLERUP (2017): Wood-Stoves2020: Development of Next Generation and Clean Wood Stoves - Final Project Report. Straubing, 60 Seiten

[44] RÖNNBÄCK, M.; PERSSON HENRIK; JESPERSEN, M. G.; HINNERSKOV JENSEN, J. (2016): Documentation and evaluation of field data demonstration, Jg. 2016

[45] SALMANG, H.; SCHOLZE, H. (1982): Keramik. Teil 1: Allgemeine Grundlagen und wichtige Eigenschaften. Sechste, verbesserte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1 online resource, ISBN 3642474934

[46] SCHLICHTER M. (2017): Aktuelle Erfahrungen aus der Überwachung von Kleinfeuerungsanlagen. 21. Arbeitskreissitzung Holzfeuerung. Straubing vom 17.05.2017

[47] SCHUESSLER, I. (2017): Sensor screening and evaluation. Gas sensors for automated stove control systems. ERA-NET Wood Stoves 2020. Borås, 118 Seiten

[48] STEFAN AIGENBAUER, WILHELM MOSER, CHRISTOPH SCHMIDL (2011): Endbericht Neue Öfen 2020

[49] TATAREK: Bedienungsanleitung

[50] TRUCKENBRODT, E. A. (2008): Fluidmechanik. Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. Klassiker der Technik. [Online-Ausg. der]

4., erg. [gedr.] Aufl. 1996, Nachdr. 2008 in veränd. Ausstattung. Berlin, Heidelberg: Springer, Online-Ressource, ISBN 3540790179

[51] VEIREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI) (2006): Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung. VDI-Richtlinien ; VDI 2066, Blatt 1. Berlin: Beuth, 111 S. Seiten

[52] WÖHLER, M.; ANDERSEN, J. S.; BECKER, G.; PERSSON, H.; REICHERT, G.; SCHÖN, C.; SCHMIDL, C.; JAEGER, D.; PELZ, S. K. (2016): Investigation of real life operation of biomass room heating appliances – Results of a European survey, Jg. 169, S. 240–249

[53] WÖHLER, M.; JAEGER, D.; PELZ, S. K.; THORWARTH, H. (2017): Potential of Integrated Emissions Reduction Systems in a Firewood Stove under Real Life Operation Conditions

Anhang A



Final project report

Project acronym	Wood Stoves 2020				
Full project Name	e Development of Next Generation and Clean Wood Stoves				
Official project duration	n August 2013 – Jun 2017				
Coordinator institution	Technology and Support Centre of Renewable Raw Materials (TFZ)				
Coordinator name	Dr. Hans Hartmann				
	RIKA Innovative Ofentechnik GmbH (RIKA)				
	BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH (BIOS)				
	Kutzner + Weber GmbH				
Partners	RISE Research Institutes of Sweden (formerly SP)				
	Nibe AB				
	Technical University of Denmark (DTU)				
	HWAM A/S				
	Robert Mack, Dr. Hans Hartmann (TFZ)				
	DiplIng. Dr. techn. Christoph Mandl, Prof. UnivDoz. DiplIng. Dr. Ingwald Obernberger (BIOS)				
Authors contributing to	Ingmar Schüssler (RISE)				
final report	Florian Volz (Kutzner+Weber)				
	Johan Furborg (Nibe)				
	Jytte Illerup (DTU)				
Date	August 2017				

1. Status quo of the project (achievement of milestones and objectives with regard to the work plan; Estimate the current degree of completion of the planned objectives; auto-evaluation of the internal cooperation and added value of internat. cooperation to the project)

Table of contents

1	WP	1: Automated process control for stoves	2
	1.1	Sensors for automated process controlled stoves (RISE/BIOS)	3
	1.2	Automated process control concepts	6
	1.3 (BIOS/	Testing results and technology-specific reports on temperature based stove control concept (RIKA)	7
	1.4 (Nibe/F	Testing results and technology-specific reports on flue gas sensor based stove control concept RISE)	9
	1.5 tempe	Testing results and technology-specific reports on stove control based on combination of rature measurement and flue gas sensors (HWAM/ DTU)	10
	1.6	Testing of several retrofit controllers and draught stabilizers (TFZ)	13
	1.7	Development of a new temperature based retrofit control concept (K+W)	17
2	WP	2: Measures for emission reduction	18
	2.1	Low emission high efficiency stove concept (BIOS)	19
	2.2 stove (Concepts for the optimised implementation of a high temperature catalyst into a low emission [BIOS]	24
	2.3	Concepts for the optimised implementation of a mesh catalyst into a low emission stove	



	(RISE	/Nibe)	29			
	2.4	Evaluation of foam ceramic filters or their replacement by a catalyst insert (TFZ)	32			
3	WP	3: Increasing efficiency and applicability	38			
	3.1 emissi	Concept for the integration of a heat storage system based on a phase change material into a logion stove (BIOS)	w 38			
	3.2	Determination of standing losses of stoves and their prevention (TFZ)	41			
	3.3	Evaluated concepts for stove draft stabilization	47			
	3.4	Summary on chimney draught impact on emissions and efficiency	47			
	3.5	Potential for fan stabilized combustion (RISE/Nibe)	48			
4	WP	4: Testing and evaluation of the technologies developed	50			
	4.1 condit	Common method for testing of the improved stoves or system components under harmonised ions	50			
5 WP 5: Elaboration and dissemination of guidelines for the design of future low emission stoves and for the retrofit of old stoves						
6	WP	6: Management and coordination	56			

1 WP 1: Automated process control for stoves

The biggest challenges in stove operation are the unknown user behaviour and the constantly changing boundary conditions due to the rather short batch combustion. The solution is to adjust the air flow with regard to the current combustion condition in order to minimize emissions of unburnt components as well as to reduce unnecessary excess air which prevents standing losses and increases efficiency.

Advanced automated control systems provide the basis for a low emission stove operation at increased efficiency since they also contribute to a minimisation of user induced operation errors. Therefore, the optimisation and introduction of such systems, which are presently not widely-used, can have a huge impact on emission reduction from stoves. Moreover, retrofit control units for existing stoves open a wide field of application with an even larger potential for emission reduction.

Common logwood stove concepts are usually manually controlled (by a control switch). Therefore, process control efforts are usually limited to a change of combustion air distribution at the end of the ignition phase. Recent technical solutions towards stove automation can be differentiated into automatically controlled stoves and stove add-ons, e.g. which apply automatic air control:

Automatically controlled stoves

- Thermo-mechanically operated air flaps (e.g. HWAM automaticT)
- Electronic sensor driven automatic control concepts (e.g. RIKATRONIC™, HWAM Autopilot IHS™)

Stove add-ons and retrofit systems, apply automatic air control

- Chimney draught stabiliser and flue gas fans (e.g. K+W draught stabilizer, ATEC Florian)
 Air and flue gas flaps (e.g. K+W Compact, Schmid SMR, TATAREK RT8OS-G-TD, Brunner
- EOS, OCOntrol)
- Electronic air distribution systems (ATEC Airmaster)

For advanced control of stove operation both the choice and implementation of reliable sensors as well as the development of useful algorithms for either integrated or retrofit control units were investigated within the project. In a first step, sensors for relevant flue gas components and possible other parameters available on or close to introduction into the market were evaluated and a preliminary assessment of their applicability for process control in stoves was performed. Furthermore, control algorithms for integrated systems adapted to advanced wood stoves as well as retrofit systems were elaborated, implemented and tested. The outcomes of the investigations regarding the improvement of wood stoves by the application of automated control concepts are summarized in the "Guidelines for automated control systems for stoves" (see section 5).



1.1 Sensors for automated process controlled stoves (RISE/BIOS)

The automated control system has to be able to rely on the information given by the sensors. Therefore the choice of sensors is crucial. Certain specific criteria should be considered when selecting sensors, which include costs, availability, life span, temperature resistance as well as signal selectivity, stability & processing. Within task 1.1, screening & testing of flue gas sensors was performed with regard to the named criteria. The task started with a literature study & market research for finding feasible and available sensors, followed by an experimental evaluation of selected sensors.

Literature study & market research. The literature study focused on sensors for determination of oxygen and unburnt components and their development during the last decade, with special emphasis on gas sensors that had been tested with stoves or other small scale biomass combustion appliances. In general there were a limited but somewhat growing number of sensors that had been studied in the different reviewed projects, especially regarding sensors for unburned gases. Many projects focused on the development of control concepts, mostly for boiler appliances. But there were also some which involved stoves or covered the sensor evaluation itself. In summary, it takes a long time to finally develop a sensor for use in real life environment. Many of the reviewed projects have used the same sensor models and there a constant improvement over the years can be observed, especially with regard to durability. Oxygen sensors showed in general good accuracy and only little cross sensitivity. That means the determination of the oxygen content has been reported to be reliable, at least in the focused oxygen area. Sensors for carbon monoxide and other unburned gases usually generate a combination signal of all unburned components. That means there is still a rather poor selectivity for single components. Most evaluated sensors showed noticeable cross sensitivities for oxygen, moisture and temperature as well as improvement potential regarding accuracy and long term stability. Nevertheless it has been reported that these sensors provide reliable trends and a proper determination of overall ranges. And according to the reviewed studies the initial utilization of sensors for carbon monoxide and unburned components in control concepts has also been successfully proven.

A market research for feasible and available sensors was performed with the aim to be the basis for the sensor selection for automated control systems. With regard to the specified selection criteria the market research collected information on operational characteristics such as

- measured component and measurement range,
- power consumption,
- expected life span,
- permitted temperature range,
- cross sensitivities, long-term drift,

- known risks for sensor poisoning as well as response to stove-typical dust and tar levels.

In addition, it was asked if there was any practical experience with applications in the stove or other biomass sector, and information was collected on availability and price level for sensor and electronics. In accordance with the literature study, the market research resulted in only few sensors, which met the requirements, especially regarding operation range, availability and development status (beyond prototype). It also turned out that the identified oxygen sensors (from manufacturers as NGK Spark Plug, Bosch, LogiDataTech, Scantronic or Heraeus) were mainly commercially available and had in general a greater utilization experience than the detected sensors for unburned components respectively combination sensors for oxygen and unburned components (from manufacturers as LAMTEC, FIGARO, Scantronic, SenSiC).

Experimental Evaluation. Based on the market research four sensor models were selected for a more extended evaluation. These sensors were the two NGK lambda probes OZA685-WW1 (switching type) and ZFAS-U2 (broadband type), the combination probe KS1D (Lamtec) for oxygen and carbon monoxide and the SenSic CO/O₂ sensor.





Figure 1: Evaluated sensors: NGK lambda probes OZA685-WW1 & ZFAS-U2, SenSic CO/O2 probe, Lamtec KS1D (from left to right)

Evaluation of lambda probes. Three units from each of the lambda probes OZA685-WW1 and ZFAS-U2 (manufacturer NGK Spark Plug) were studied in a ca. 550 hour long-term stove evaluation with recurring comparative measurements using standard flue gas analysers. Additionally, the lambda probes were checked against known gas compositions in a test gas rig prior, in the middle and after the stove evaluation period.



Figure 2: Comparison of lambda probes with standard gas analyser at stove operation

In summary, both lambda probes demonstrated a highly accurate oxygen determination within the whole oxygen range when comparing probe signals with set point values in the test gas rig. Comparing probe signals at stove operation with O₂ values derived from standard analysers only minor deviations could be seen; with broadband type ZFAS-U2 slightly more accurate than switching type OZA685-WW1. This deviation during stove operation is mainly based on cross sensitivities to hydrocarbons & carbon monoxide. Figure 2 shows a comparison of lambda probe signals (3 for ZFAS-U2 probe electronics, 3 for OZA685-WW1 probe, 3 for OZA685-WW1 probe electronics) with values derived from a standard analyser (paramagnetic oxygen analyser corrected to wet conditions by using water concentration measured by FTIR) during a comparative measurement campaign. Regarding durability and long-term stability no aging effect could be observed during the evaluation. The signal characteristics at the end stayed unchanged compared to the ones for the unused probes. Particle deposit on the probe surface, observed both in the middle and at the end of the evaluation, had no noticeable effect on probe functioning. Comparing both probes, the broadband model ZFAS-U2 shows a slightly better accuracy, while the switching type model has advantages in price level and simplicity of implementation.

Evaluation of SenSic CO/O2 probe. In total three units of the SenSic CO/O₂ probe (first one was used in first half of the evaluation, other two in second half) were studied, again in the in total ca. 550 hour long-term stove evaluation.





In summary, the SenSic CO/O₂ probe enabled for a reliable detection of carbon monoxide gradients & overall ranges, thus allowing for example to identify a successful batch ignition or the start of charcoal burnout. The oxygen concentration had a noticeable impact on the sensor signal which complicates the determination of precise carbon monoxide concentrations. Oxygen impact can be reduced for example by increasing the temperature on the sensor surface, but this will also affect the CO resolution capacity. On the other hand a combination of sensors operating at different temperatures could be used to improve CO concentration accuracy and also enable for an oxygen determination. Figure 3 shows an example for probe signals during stove operation (with the two probes operating at differing temperatures) in comparison with the dry oxygen and CO concentration derived from standard analysers and the O₂ signals from the lambda probes. Regarding long-term durability a noticeable signal drift has been observed during the first hours of sensor operation, which possibly could be managed automatically by the probe electronics. Despite the fact that there was no probe failure during operation, some problems with single sensor channels (two sensors on one probe) still occurred. It can be concluded that the probe electronics were found to be somewhat improvable, mainly regarding robustness, stability as well as miniaturization potential and price level.

Experimental Evaluation of Lamtec KS1D probe at BIOS

The combination probe KS1D (2 identical sensors) has been tested at an adapted 8 kW logwood chimney stove. In total 47 test runs with 273 batches have been performed. The overall operation time of the logwood chimney stove can be amounted to approx. 255 hours. One sensor has been tested for approx. 150 hours. Figure 4 shows the results of a test run with the combination probe at the logwood stove.





Figure 4: Results of a test run with Lamtec KS1D probe Explanations: O₂ and CO related to dry flue gas; test run with low-emission logwood stove

The stove was operated at typical air supply conditions leading to average O_2 contents in the flue gas between 8 and 13 vol% (dry flue gas, mean values of batches). The flue gas temperature at the sensors was in the range of 150 to 170 °C (excluding the ignition batches). After an operation time of approx. 255 hours (150 hours for Sensor 1) no deposits have been observed on the sensors during inspection. The particulate emissions (TSP) in the flue gas downstream the stove can be amounted to 20 - 35 mg/MJ (35 - 100 mg/MJfor the ignition batches) according to measurements performed during selected test runs. Generally, the combination probe KS1D seems to be suitable for the implementation into an automated stove control concept based on the results achieved so far. The sensor can well reproduce the O_2 trend over the entire range of operation of a log wood stove. Regarding CO some deviations, especially at higher CO levels (> 1,000 ppmv), occurred. However, the CO trend is sufficiently well predicted. By now the costs of purchase (single unit: $600 - 1,000 \notin$ including converter) are too high. In future the converter may be integrated in the controlling plate of the automated control system of the stove and thereby the costs can be significantly reduced. Due to the currently high costs the combination probe KS1D is not recommended for the integration in the automatic control system of stoves.

Conclusions. A fast and reproducible response to gas concentrations changes was observed for all evaluated sensors. The reliable determination of the current combustion condition only on the basis of the sensor signals was possible at all times during the complete evaluation period, and it was shown that the probes withstand the exposure to high temperature, dust load and variable gas concentrations. Based on the evaluation, it can therefore be stated that an automated control system can rely on the signals provided by these sensors. Regarding economic considerations, both lambda probes should be an affordable choice for utilization in an automated control system, while the KS1D combination probe and the SenSic CO/O₂ probe including their electronics are seen as currently still too expensive for a broader use in the stove sector. More information on sensor screening & evaluation can be found in a <u>separate report</u> (see section 5).

1.2 Automated process control concepts

Several different systems of automated controls as well as retrofit systems for logwood stoves have been elaborated, implemented and tested. BIOS & RIKA have further developed, implemented and tested an automated control system based on temperature measurements in the combustion chamber and flaps for combustion air supply control. The system has been specially tailored to the stove developed and tested



within WP 2 and WP 4. RISE & NIBE have further developed, implemented and tested an automated control system based on a combination of temperature and oxygen measurements and flaps for combustion air supply control. The system has been tested at an advanced wood stove. HWAM A/S and DTU Chemical Engineering have developed and tested a digital control system which is able to control three combustion air inlet valves separately. The control system was implemented on HWAM wood stoves and tested in laboratories and in private homes (field tests). TFZ and K+W have improved a retrofit control unit (with electrically driven combustion air flaps) for continuous adjustment of the air supply of the stove. The work performed is summarised in the following sections (1.3, 1.4, 1.5 and 1.6).

1.3 Testing results and technology-specific reports on temperature based stove control concept (BIOS/RIKA)

BIOS & RIKA have further developed, implemented and tested an automated control system for logwood stoves. The system has been specially tailored to the new stove developed and tested within WP 2 and WP 4.

The automated control system of RIKA is based on a temperature measurement in the combustion chamber and flaps for the combustion air supply control. The different combustion phases can be identified by temperature changes and since temperature sensors are the cheapest sensors available and also rather robust, they offer a suitable opportunity for stove control. The basic control strategy can be described as follows:

Ignition phase

• Mainly primary air and a low amount of window purge air is supplied in order to facilitate a quick ignition and rapid increase of the combustion chamber temperatures

Transition to main combustion phase

- As soon as the temperature in the combustion chamber exceeds a certain level the primary air damper is closed to avoid excessive burning rates.
- At the same time secondary air and window purge air flows are increased to maintain adequate combustion air supply.
- During the main combustion phase the secondary and window purge air flow should be kept rather constant. The distribution between these two flows depends on the furnace design (combustion chamber and air injection nozzle geometries) and should be experimentally optimised for a specific stove type.

Transition to charcoal burnout and charcoal burnout phase

- When the furnace temperature starts to drop below a certain value, the amount of secondary and window purge air should be reduced to keep the temperature at a reasonably high and nearly constant value until the end of the batch.
- Thereby, excess oxygen is kept low and too much cooling of the combustion chamber is prevented.
- As soon as the flames extinguish the CO and OGC emissions strongly increase. Thus, re-charging of fuel should be performed as soon as the flames extinguish.

The automated control has been integrated into the new Low-emission wood stove with integrated PCM heat exchanger of RIKA (see also WP2 and WP4). Then, test runs have been performed with the new stove in order to evaluate the performance of the automated control system. The test stand setup of BIOS is shown in Figure 5.





Explanations: TSP ... Total suspended particulate matter; BLPI ... Berner-type low pressure in ELPI ... Electrical low-pressure impactor

Test runs with and without automated control system were carried out in order to compare the results and to evaluate the influence of the automated control system on the combustion behaviour. Figure 6 shows the comparison of stove operation with manual and automated control. The controlled air supply shall reduce the emission peak at the beginning of the batch and shall keep the emissions during the main combustion and the charcoal burnout phase lower due to higher combustion chamber temperatures.



Figure 6: Results from test runs with the new stove applying automated and manual control systems Explanations: O_2 related to dry flue gas; emissions related to dry flue gas and 13 vol.-% O_2

High furnace temperatures and consequently lower emissions could be reached within a shorter time during the ignition phase by a proper balancing of primary and window purge air. More stable O_2 concentrations in the flue gas, generally lower O_2 -levels (relevant for a high thermal efficiency of the stove) as well as sufficiently high temperatures for improved burnout could be achieved during the main combustion phase as well as during the burnout phase by controlling the combustion air flow in dependence of the furnace temperature as well as temperature gradients; this resulted in lower gaseous as well as particulate emissions



compared to manual control as shown in Figure 7.



Figure 7: Emission reduction achieved by implementing an automated control system Explanations: Mean values and standard deviations of averaged emissions over entire batches 3 to 5 (from closing the door until opening the door again for recharging) according to prEN 16510 / DIN EN 13240

By the implementation of the automated control the thermal efficiency could be increased (up to 2 % points) mainly due to lower O_2 -levels in the flue gas as shown in Figure 8.



Figure 8: Efficiency increase achieved by implementing an automated control system Explanations: Mean values of O₂ over entire batches 3 to 5 (from closing the door until opening the door again for recharging); calculation of efficiency according to prEN 16510 / DIN EN 13240)

Conclusions. An integrated automated stove control system based on combustion air control in dependence of the combustion chamber temperature has been developed and proven as suitable concept for stoves to reduce emissions and to increase efficiency. Test run results show that a considerable reduction of the gaseous as well as the PM emissions and an increase of the thermal efficiency is possible by an appropriate automated control of the air supply of the stove.

It is of importance that the automatic control system is specifically adapted to the stove on which it is implemented. Therefore, an integrated solution is definitely preferable compared to an add-on solution, particularly if this add-on solution can only adjust the total combustion air without allowing any differentiated adjustment of primary, secondary and window purge air flow.

1.4 Testing results and technology-specific reports on flue gas sensor based stove control concept (Nibe/RISE)

The automated stove control concept is mainly based on flue gas sensors for temperature and oxygen (thermocouple & lambda probe). It uses the information from these sensors and an additional door switch to identify the current combustion phase by detecting operational events, as for example door opening, successful batch ignition or the start of the charcoal burn-out. With regard to the identified phase it adjusts settings for three combustion air dampers as a function of the measured oxygen & temperature in order to



achieve optimal conditions for highly efficient combustion at low emissions. The three dampers regulate the combustion air through the grate (primary dampers), the window purge air (secondary dampers) and the air flow from rear wall nozzles (tertiary dampers). The basic control strategy for the main operational states can be described as follows:

Check ignition (Ignition phase). The aim is to ignite the wood and increase the temperature in the combustion chamber as quickly as possible to avoid unnecessary release of unburnt components. In order to achieve a high air flow the air dampers are opened when the check ignition signal is triggered. During ignition the oxygen content in the flue gas is reduced while temperature increases. When both signals reach a certain lower respectively upper value the primary damper is closed. This marks the transition to the next operation state.

Burning (main combustion phase). With primary damper closed the wood gasification rate is slowed down in order to avoid insufficient oxygen supply in the gas combustion zone. In the following the control adjusts secondary and tertiary dampers to keep temperature and oxygen in the flue gas within defined ranges. The secondary damper setting is thereby based on temperature and tertiary damper on oxygen content. In order to achieve a smooth combustion, rapid and too large changes in damper settings should be avoided. In the end of this phase, when less volatile matter will be released from the fuel and mainly charcoal remains, the oxygen signal will increase above the desired range despite having the corresponded dampers adjusted to its defined minimum position. This marks the end of this state and the transition to the next operation state.

Burnout (charcoal combustion). During this phase the control is based on oxygen signal and adjusts primary and secondary dampers accordingly in order to keep the oxygen level within a defined range. Enabling primary air accelerates charcoal burnout in the fire bed, thus generating heat to avoid a rapid drop in combustion chamber temperature. When the oxygen content rises above the desired range, despite that the dampers are at their final positions, the stove will trigger the signal for the next batch.

If the user follows this recharging signal the stove will switch back to check ignition, starting a new cycle. If the user refuses to recharge, the stove switches to shutdown operation state. At its end (when reaching the final levels for oxygen & temperature) the dampers are closed to minimize standing losses.

The control system is a further development of a previous concept that was using only oxygen signals to adjust two dampers, with the aim to obtain a more improved control system which has a wider tolerance to user interaction and can be more easily adapted to other stove models. For situations where a flue gas fan is necessary (e.g. insufficient draft due to installation limitations, weather conditions or secondary measures such as filters or catalysts) the integration of such a fan into the stove control concept is possible, either for intermittent operation for certain phases (as for example cold ignition or recharging) or for continuous draft dependant operation (using for example the existing additional pressure transmitter).

Laboratory tests and conclusions: Automated control concepts have been implemented and tested with different stove models. Several test runs have been carried out with these stoves to evaluate the performance under recommended conditions (mainly concerning wood mass, wood properties, log orientation, etc.) as well as deviations from these recommendations to simulate user interaction. Compared to manual operation at fixed dampers the stove performances consistently improved when using the automated control. Carbon monoxide and hydrocarbon emissions were significantly reduced, while the efficiency increases. The control system itself is also self-sustaining in terms of reacting on unforeseen combustion conditions. This means that real life stove operation will result in similar performance characteristics as achieved when testing at optimized laboratory conditions.

Regarding particles, a further decrease in PME could unfortunately not be obtained when comparing to the already quite low values from manual operation under recommended conditions. Any additional particle reduction would therefore require further design optimization or the integration of effective secondary measures.

A preferable control of the heat output is another challenge that has been identified. The heat output is largely based on the amount, size and moisture content of the wood and can only marginally be controlled by damper settings that will be adjusted for achieving optimal combustion conditions. And finally, since the integration of an automated control system will increase the end consumer price of the stove, the market potential remains limited if such appliances continually have to compete with simple and cheap stoves (which however still comply with current regulations).

1.5 Testing results and technology-specific reports on stove control based on combination of



temperature measurement and flue gas sensors (HWAM/ DTU)

The control system consists of an advanced software program based on the definition of different combustion phases, and it uses three process parameters: measured flue gas temperature, O_2 -concentration in the flue gas, and room temperature. The basic control strategy for the main combustion phases can be described as follows:

Ignition phase:

• The secondary and primary air inlets are fully opened to achieve a fast ignition of the wood and thereby a fast increase of the temperature in the combustion chamber.

Combustion (flame) phase

 The primary air inlet is closed to stabilize the temperature and the secondary and – if available – the "tertiary air" (air flow from rear side air nozzles) are open to keep the temperature and the oxygen in the flue gas within defined ranges.

Charcoal burnout

• The tertiary air is closed and the primary and secondary air inlets are opened to a level keeping the oxygen and the temperature level within defined ranges. When the temperature falls below a certain level, the stove signalizes the recharging for the next batch.

The measurement and optimization of the oxygen concentration avoid both, too high excess air ratios and under-stoichiometric combustion which may result in low thermal efficiency and in high pollutant emissions, respectively.

Field tests. The control system was tested on a number of wood stoves operated by ordinary wood stove owners to see the influence of private stove user practices on emissions and efficiency. At each test site continuous measurements of O_2 , CO_2 , CO and flue gas temperatures were conducted with both, the existing stove and the new HWAM IHS stove (Intelligent Heat Systems) (Figure 9). For the same wood stove users the measuring period for each stove was one week. All the tested IHS wood stove models were equipped with a prototype of the automatic control system. The person handling the firing on the test site was instructed to use the stoves as usual, that means using the same kind of wood and firing in the same way; so no instructions were given to the private wood stove users on how to operate the IHS stoves with respect to firing etc.



Figure 9: Illustration of a test set-up in a private household.

An example of a typical situation is shown below (Figure 10) where the user for the manually controlled wood stove applies too little air during the flame phase and too much air during the char combustion.





Figure 10: Field test measurements conducted with privately operated wood stoves with the user applying a manually controlled stove a) and an automatic HWAM IHS stove b) (two combustion cycles).

As seen from Figure 10 very constant flue gas temperatures, O_2 and CO concentrations were obtained when the user applied the HWAM IHS wood stove. Especially in the flame combustion phase, a significant reduction of the CO concentration was seen. For almost all the measurements at the six test sites significant improvement of the combustion process was observed resulting in higher thermal efficiency and lower CO emissions.

Laboratory tests. The research wood stove experimental set-up at DTU Chemical Engineering included a digitally controlled wood stove on a scale, a stack, a dilution tunnel for collecting particles on filters (Norwegian Standard), a counting device the particle numbers (SMPS), sampling sites for measurement of gaseous emissions (CO, VOC, O₂, CO₂, NO_x), as well as thermocouples to measure the temperatures in the combustion chamber and in the chimney.

Figure 11 shows typical examples of emission levels for CO, VOC, particles and temperatures in the combustion chamber.



Figure 11: Emission and temperature trends for three batches illustrating the levels in the different combustion phases (Phase 1: ignition phase, Phase 2: flame phase, Phase 3 char phase). T2: Temperature in the fire just above the grate, T8: Temperature in upper part of the free board.



The highest particle emission was seen for the first batch when starting-up the cold stove. For the subsequent batches only relatively small increases of the emissions were observed in the ignition phase. Furthermore, the ignition phases are relatively short, especially for the second and third batches. During the flame combustion phases low and constant emissions of CO, VOC and particles are observed. In the char combustion phase an increase of CO emission was observed but the particle emission level was low in this phase.

Conclusions: The automatically controlled wood stove, HWAM IHS, was developed and launched on the market. The experimental results showed that the digital control of the combustion process ensures constant and optimal temperatures and overall oxygen concentrations in the combustion chamber, resulting in low PM and CO emissions well below current standards, and high efficiency. From field tests significant reduced emissions and high efficiency were seen for the IHS stoves compared to manually controlled stoves. Emission measurements at the research wood stove set-up at DTU Chemical Engineering showed a short increase in the emissions of CO, VOC and PM in the ignition phase, a small particle peak in in the flame phase, and an increase of CO emission in the char combustion phase due to decreasing temperature in freeboard. Almost no particle emissions were observed in the char combustion phase. The new control system ensures improved stove operation even when used by private wood stove owners - this improved performance has been verified by field tests in private homes.

1.6 Testing of several retrofit controllers and draught stabilizers (TFZ)

Several retrofit control units and one mechanically draught stabilizer were tested in WP4, Table 1 shows an overview. The three control systems which are regulating the combustion air inlet were tested under controlled draught conditions. The ATEC Florian and the draught stabilizer were tested under natural draught conditions, as described in chapter 4.1.

Testing conditions:	Controlled draught			Natural draught		
Туре:	TATAREK RT8OS-G-TD	Schmid SMR	K+W Compact	ATEC Florian	K+W draught stabilizer	
Functioning principle	Thermocouple + electronical flap	Thermocouple + electronical flap	Thermocouple + electronical flap	Thermocouple + draught and velocity sensor + electronical flap + fan	Mechanical flap	
Position of installing	Air supply socked	Air supply socked	Air supply socked	Between chimney wall and flue gas pipe	Between chimney wall and flue gas pipe or at chimney sole	
Approx. end costumer price incl. accessories	276€	1,100 €	1070 € (without Display)	300 €	300 €	

Table 1: Overview of the tested devices

In a pre-testing phase, the controller settings were adjusted to the stove during an optimisation routine (where possible); this was to allow the best possible stove performance with each particular controller.

Figure 12 shows the CO and the OGC emissions when using the particular retrofit controllers compared with the manual operation of the stove. The best stove performance regarding the gaseous emissions at controlled draught could be achieved by using the TATAREK controller, which reduces the CO emissions by 56 % and the OGC emissions by 38 %. The Schmid SMR controller causes quite similar CO and OGC reduction. The K+W compact reduced CO emissions by 40 % and OGC emissions by 15 %. For the three combustion air controllers tested when applying controlled draught conditions, the main influencing parameters to the gaseous emissions were the refilling signal given by the controller, and the throttling of oxygen at the end of the batch. The closer the refilling signal is given at flame extinction the lower are the CO and OGC emissions at the end of the batch.



At natural draught the ATEC Florian reduces CO emissions by 37 % and OGC emissions by 27 % while the draught stabilizer yields to higher gaseous emissions. This may be due to the fact that some stoves have lower CO and OGC emissions at higher draughts as shown in WP2.



Figure 12: Comparison of the CO and OGC emissions using several retrofit semi-automatic controllers compared to completely manual log wood stove operation

Regarding the particle emissions measured (Figure 13) the manual operation seems to be the best case. But it should be stated, that by using the TATAREK or the K+W controller the particle emissions are in a similar range, considering the uncertainty of the particle measurement. Certainly the particle emissions can be more than twice as high if the controller doesn't allows enough adjustment possibilities for individual adaptation to the particular stove type. One reason for possibly higher particle emissions is a higher air supply during the beginning of each batch (when the automatic flap is fully open); this could result in higher furnace temperatures and thereby higher mass burning rates (especially Schmid SMR). At natural draught operation the ATEC Florian reduces the particle emissions by approx. 31 % while the draught stabilizer leads to 14 % higher particle emissions. In the case of the ATEC controller this may have been caused by the additional baffle in the flue gas duct (ATEC) which has presumably influenced the flow condition in the particular stove positively, leading to lower CO, OGC and PM emissions.





Figure 13: Comparison of particle emissions using several retrofit semi-automatic controllers compared to completely manual log wood stove operation

Figure 14 shows the efficiency impact using the selected retrofit controllers on the tested stove. At controlled draught the tested controllers increasing the efficiency by 1.5 to 4.6 %. The largest influencing parameters are the tightness of the air flap (q_cool) and the adaption of the air supply over the batch (q_a). It was also observed that the amount of charcoal that remains in the furnace after stove operation increases by using a controller; this effect is depending on the tightness of the air flap. These charcoal residues are claimed as losses in the common type testing standards. In future it might be meaningful to instruct the user in the stove manual to use these residues when starting the next stove operation. Then these losses from such residues could be ignored, which would lead to an efficiency gain of another 0.4 to 1.5 percentage-points, compared to a manual stove operation (without closing the flaps of the stove after heating).

At natural draught the efficiency is increased by about 6.2 % when using the ATEC Florian and by about 9.9 % when using the draught stabilizer. This is due to the efficiency losses at higher chimney draughts that are illustrated in WP2. The losses by charcoal residues are slightly higher than for the manually operated stove. But in contrast to the combustion air controlling systems there is less potential to avoid standing losses when using a flue-gas-integrated system as the ATEC Florian.







The possible fuel savings by prevention of standing losses and efficiency increase when using a combustion air controller with an air tight flap is shown in Figure 15, which displays the example of the Schmid SMR. Considering a realistic number of 100 heating cycles annually, the price for the saved air dried beech wood by preventing standing losses and by creating the efficiency increase as reported above amounts to about $48 \notin /a$. With an end costumer price of approximately $1,100 \notin$ the controller needs about 23 years of pay-off-period. To become economically interesting the price for a retrofit combustion air control unit should be around $250 \notin$ (i.e. 5 years pay-off-period).



Figure 15: Possible fuel savings by prevention of standing losses and efficiency increase when using a combustion air controller with a completely air tight flap (Schmid SMR). stacked cubic meters of logs. Heating cycle: sequence of several batches in a heating operation

In conclusion it can be stated that combustion air controllers can significantly reduce gaseous emissions from log wood stoves. For PM emissions, however, it was shown that if the adaption of the controller's settings to the individual stove type is performed correctly no improvements compared to a professional manual stove operation can be achieved. But in practise this adaption of the control settings can only be



performed by the stove manufacturer or by a specifically trained service person. Without such adaption the particle emissions could be significantly increased when using the retrofit controller (Schmid SMR). Chances for improvements may be given by delaying the refilling signal, but this could counteract with the gaseous emissions which would then be slightly increased. When the controller is installed downstream in the flue gas duct (ATEC) it can reduce both, gaseous and particle emissions. The also tested draught stabilizer (K+W) leads to higher emissions for this particular stove.

The biggest advantages of retrofit controllers may be seen in the prevention of operating failures by the user (e.g. wrong moment of recharging) and the prevention of heating and standing losses. Regarding the standing losses only combustion air controllers have the full potential of minimization; a draught control device in the flue gas duct would not be as effective as it shall never be closed completely.

It is recommended to construct retrofit controllers with fully air tight closure of the flap. The controllers should only be sold for dedicated stoves where the respective parameters were already set. An end costumer price of approx. $250 \in$ should be the target.

1.7 Development of a new temperature based retrofit control concept (K+W)

Pre-test results in chapter 1.6 had shown that the correct adjustment of a retrofit controller is highly important. Correct parameter settings can reduce emissions while wrong adjustments can also increase emissions compared to manual operation. Such adjustment is time consuming and error prone, therefore retrofit controllers with the capability of automatic adjustment to the stove would have clear advantages.

Therefore an adaptive and flexible control concept was developed and implemented on a LabVIEW based prototype. This prototype was tested on four different stove types. Both, efficiency and emissions were evaluated according to the method described in chapter 4.1.



Figure 16: Comparison of auto adaptive (K+W prototype) and standard controller in terms of gaseous emissions. K+W holes: an automatic air flap with punched holes (9 cm²) was applied to avoid full closure.





Figure 17: Comparison of auto adaptive (K+W prototype) and standard controller in terms of gaseous- and particle emissions. K+ W holes: an automatic air flap with punched holes (9 cm²) was applied to avoid full closure.

Figure 16 and Figure 17 are comparing the auto adaptive prototype with the K+W standard controller and manual operation. Gaseous emissions could be reduced, but particulate matter emissions were increased.

As described in chapter 1.6 timing of the refilling signal can optimise the gaseous emissions but has also an impact on the PM emissions. This interrelationship is not completely understood but it seems that the refilling time is an important point for reducing PM emissions to a level which is close to manual operation.

The efficiency (shown in Figure 18) was increased about 1 % compared to the K+W standard controller and almost 3 % compared to reference by manual operation.



Figure 18: Comparison of auto adaptive (K+W prototype) and standard controller (K+W) in terms of efficiency.

In summary the developed self-adapting concept shows that it is possible to operate the tested stoves at the same emission level as with the K+W standard concept. Optimizing potential is also given and it is required to test the concept on a bigger number of different stoves.

2 WP 2: Measures for emission reduction

To meet the climate targets, CO_2 -neutral residential heating by biomass combustion is a meaningful option. But to face the justified increasingly stricter emission limits biomass combustion plants and stoves have to



prove their future right to exist by reducing the gaseous and especially the particle emissions drastically compared to the state of the art. WP 2 deals with the question how far the emissions of log wood stoves can be reduced by primary measures such as CFD based optimization of insulation, combustion chamber geometry and air distribution (section 2.1), and by secondary measures such as implementation of oxidation catalysts (section 2.2, 2.3) or foam ceramic filters (section 2.4).

2.1 Low emission high efficiency stove concept (BIOS)

Based on a new stove concept of RIKA a basic design for the new Low-emission wood stove has been developed. Options and constraints for the integration of a heat storage system based on PCM (see section 3.1) have been considered as well. An appropriate insulation of the main and the post combustion chamber is of great importance for an almost complete burnout of the flue gas. Moreover, an efficient mixing of the flue gases with the combustion air and the application of air staging are of relevance in terms of low emissions. Finally, a PCM heat exchanger to maximise the efficiency has been implemented into the stove concept. A scheme of the concept for the new Low-emission and high efficiency stove with integrated PCM heat exchanger is shown in Figure 19.



Figure 19: Scheme of the basic concept of the new Low-emission and high efficiency stove with integrated PCM heat exchanger

Explanations: The new stove concept is protected by a patent.

In a next step the geometries of the main combustion chamber and the post combustion chamber as well as the air staging strategy (air distribution between different combustion air flows) were evaluated by means of CFD simulations performed by BIOS. For the simulations an innovative CFD based model for logwood fired stoves, developed by BIOS, has been applied [1]. For the CFD simulations the new low emission and high efficiency stove concept and the PCM heat exchanger have been considered. The simulations are related to the point of a batch where quasi-steady state is achieved (mid of the main combustion phase). In Figure 20 and Figure 21 relevant results of the CFD simulations performed are presented.





Figure 20: Results from CFD simulations - iso-surfaces of air, flue gas and stove temperatures [°C]

Due to the good isolation of the stove high flue gas temperatures can be achieved in the main and in the post combustion chamber. Figure 21 shows the predicted CO and O_2 concentrations in the flue gas.



Figure 21: Results from CFD simulations - iso-surfaces of CO concentrations [ppmv] and O_2 concentrations [m³ O_2 / m³ flue gas w.b.] in the flue gas

Air staging and window flushing have been optimized to ensure a clean window and low O_2 contents in the flue gas. The CFD simulations show a good mixing of the flue gas with the combustion air indicated by even distributions of O_2 and CO at the outlet of the post combustion chamber (absence of flue gas streaks). Due to the high temperatures in the combustion chambers and the efficient mixing of the flue gas with the combustion air a very high gas phase burnout quality can be achieved, indicated by very low CO emissions. The optimised positioning and improved insulation of the PCM heat exchanger enable a complete melting of the PCM and thus an efficient heat storage.

The flue gas temperature (according to EN 13240) downstream the stove can be up to 210 °C, resulting in an efficiency of 87 %. This value refers to the steady state operation, in which the efficiency reaches its minimum. At the beginning of a loading cycle (start-up of the stove) the efficiency is significantly higher (> 90 %). Under consideration of the entire loading cycle over 5 batches an efficiency of around 90 % is expected.

Based on the development work a prototype of the stove with integrated PCM heat exchanger has been constructed (see Figure 22).





Figure 22: Picture of the prototype of the new Low-emission and high efficiency stove with integrated PCM heat exchanger

Comprehensive test runs with the new Low-emission and high efficiency stove with manual control and with automated control have been performed in order to evaluate the performance of the stove in terms of emissions and to evaluate of the PCM heat exchanger. Based on the test runs the new stove technology has been further developed and stepwise optimised.

The test run series have been performed according to the methodology defined by the project consortium as well as test runs including 1 ignition batch, 4 batches of full load and 1 charcoal burnout batch. The test stand setup applied is shown in Figure 5. In Figure 23 and Figure 24 results from a test run with the new stove with automated control are presented.





Explanations: O_2 related to dry flue gas; emissions related to dry flue gas and 13 vol% O_2




Figure 24: Results from a test run with the new stove with automated control – temperatures as well as PM emissions

Explanations: emissions related to dry flue gas and 13 vol.-% O_2 ; TSP ... Total suspended particles; BLPI ... PM_1 emissions measured by Berner-type low pressure impactor; PM_1 (ELPI) ... PM_1 emissions measured by electrical low-pressure impactor

Due to the high temperatures in the combustion chambers and the efficient mixing of the flue gas with the combustion air a very good gas phase burnout quality can be achieved, indicated by very low CO and OGC emissions during the main combustion phase, and only short emission peaks at the start and the end of the batch occur. The CO und OGC emissions of the stove are well below the relevant emission limits (see Figure 25). In general, compared to state-of-the-art wood log stoves very low TSP as well as PM₁ emissions can be achieved. In this respect the high temperatures in the well isolated combustion chambers reduce soot formation.





Figure 25: Emissions in comparison to relevant limits for full load operation

Explanations: mean values of averaged emissions over entire batches 3 to 5 (from closing the door until opening the door again for recharging) according to prEN 16510 / DIN EN 13240; emission limits shown according to the respective legislation in Austria and Germany (status 07/2017) as well as according to the planed EU Ecodesign directive which shall get in force in 2022

As shown in Figure 24 the flue gas temperature increased continuously over the test run and the maximum flue gas temperature (according to EN 13240) downstream the stove was up to 170 °C high (full load operation). According to the calculations performed an efficiency of over 92 % could be reached over the whole test cycle (see Table 2). The high efficiency can be achieved due to the integration of the PCM heat storage unit. The achievable thermal efficiency of the new stove technology is considerably higher than in state-of-the-art chimney stoves (on average 82 %).

The PCM heat storage unit is loaded during the operation of the stove. The hot flue gas passes through the PCM heat storage (heat exchanger), sensible heat is transferred to the PCM and the PCM temperature increases continuously. As soon as the PCM starts to melt, also the latent heat can be stored in addition to the sensible heat. Table 2 shows the energy balance of a typical loading cycle of a wood stove with integrated heat storage unit based on PCM (5 batches at nominal load including the ignition batch and 1 charcoal burnout batch):

- Up to 44 % of the total fuel power input and more than 50 % related to the useful heat can be stored in the stove and the PCM heat storage unit, which represents a very attractive value.
- The flue gas losses are low due to the efficient heat storage of the PCM an efficiency of over 92 % (according to DIN EN 13240) can be reached for the entire loading cycle.

Table 2: Energy balance for the loading cycle of a wood stove with integrated heat storage unit based on PCM.

Explanations: it has been assumed that the entire PCM is molten because the mean temperature of the PCM at the end of the test run was at the melting point; thermal output (through radiation and convection) calculated based on measurements and results of CFD simulations performed.

Energy balance			
	kW	kWh	%
(1) Fuel power input	10.6	53.5	100 %
(2) Energy storage char coal	1.2	5.9	11 %
(3) Thermal output	3.9	19.9	37.1 %
(4) Energy storage stove	2.5	12.5	23.4 %
(5) Energy storage PCM heat exchanger	2.2	11.0	20.5 %
(6) Heat losses flue gas	0.7	3.7	6.9 %
Total energy storage (stove (4) + PCM (5))		23.53	44 %
Thermal efficiency (according to EN13240)		92.6	
Duration of test run		5.07 h	

Figure 26 shows a typical unloading cycle (natural convection only) of a wood stove with integrated heat storage unit based on PCM. The air flaps of the stove have been closed at the end of stove operation. During the unloading cycle the stove cools down rather quickly, but the PCM heat exchanger only slowly releases the heat stored, this is due to its improved isolation. After 9 h (i.e. overnight) up to 26 % of the



stored energy in total are still available in the stove and in the PCM heat exchanger. The heat release from the stove is reduced and gets discharged over a longer period of time which is of advantage for the comfort of living. By controlling the convective air flow through the heat storage unit the period of heat release can also be influenced.



Figure 26: Unloading cycle of a wood stove with integrated heat storage unit based on PCM by natural convection

Explanations: air flaps have been closed at the end of the test run; calculation performed based on energy balances and measurements of surface temperatures during unloading

Conclusions. With the new stove concept with integrated PCM heat exchanger, a renewable CO_2 -neutral room heating technology which shows low emissions and significantly increased efficiencies (> 90 %) has been developed. The gaseous and especially the particulate emissions of the new stove are on a very low level compared to state-of-the-art chimney stoves. The integrated PCM heat exchanger developed shows a suitably high heat storage capacity, a compact design and contributes to a better room climate due to its slow heat release. The final design of the new technology is currently ongoing. The market introduction of the new stove technology with integrated PCM heat exchanger is expected for 2018.

References

- [1] BENESCH C., BLANK M., SCHARLER R., KOESSL M., OBERNBERGER I., 2013: Transient CFD Simulation of Wood Log Stoves with Heat Storage Devices. In: Proc. of the 21st European Biomass Conference and Exhibition, June 2013, Copenhagen, Denmark, ISBN 978-88-89407-53-0 (ISSN 2282-5819), pp. 578-584, (paper DOI 10.5071/21stEUBCE2013-2CO.7.1), ETA-Florence Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy
- 2.2 Concepts for the optimised implementation of a high temperature catalyst into a low emission stove (BIOS)

Secondary measures like oxidation catalysts are already applied for emission reduction of wood stoves. As these catalysts are usually installed in the flue gas duct downstream the stove the emission reduction potential is limited due to:

- The comparably low temperatures at stove outlet
- The expected slow heat-up of the catalyst at this position.
- Almost no emission reduction during start-up where typically the highest emissions occur.

The main advantages of a catalyst implementation in the stove compared to an installation at stove outlet are:

- Light-off temperature can be reached in short time
- High operation temperatures of the catalysts may support tar and soot reduction
- At high operation temperatures a better VOC reduction is expected (since the VOCs are long-chain compounds and methane)

Based on this approach different high temperature catalysts have been integrated into a low-emission stove concept at different positions and their basic suitability has been evaluated.



Materials and method. As a first step catalysts available on the market and the experiences of test runs already performed have been carefully assessed. Based on the evaluation performed the two following different types of high temperature catalysts have been selected and investigated:

- Three different metal based honeycomb catalysts (active metals: Pt, Pd)
- Catalytically coated foam ceramics (active metal: Pt)

The catalysts applied have been tested at different positions of a specially adapted low emission logwood chimney stove with 2 flue gas pathways downstream the post combustion chamber (see Figure 27). The two flue gas pathways allow for the implementation of a catalyst and of a dummy (substrate without washcoat and catalytic coating), and it enables parallel measurements downstream of both elements. The metal based honeycomb catalysts have been installed at the outlet of the post combustion chamber (mounting position I). The foam ceramics with and without catalyst have been installed at the outlet of the main combustion chamber (mounting position II).



Figure 27: Schemes of the Low-emission wood stove used for catalyst testing

Long-term (2 or 3 weeks) operation of the stove with each catalyst including dedicated testing campaigns with emission measurements have been performed according to the test protocol commonly developed from all partners in the project (see section 4.1).

Results of long-term testing of honeycomb catalysts (mounting position I). Three metal based catalysts with different material properties and different active metal mixtures have been tested (see Table 3). The evaluation of the stove operation data showed, that all test runs have been performed under well comparable and representative combustion conditions. The catalysts showed only a negligible effect on the PM emissions and no effect on the efficiency of the stove.

Explanations. Cells per squ	lare inch (1 CPSI ~ 645 mm²),	remperature that marks start of reactions			
No	1	2	3		
Name	EnviCat®2520	Tailor-made catalyst I	Tailor-made catalyst II		
Supplier	Clariant AG (DE)				
Substrate	metal	metal	metal		
Structure	honeycomb	honeycomb	honeycomb		
CPSI ¹⁾	50	50	50		
Dimension (HxWxL)	32 x 160 x 50 mm	30 x 160 x 50 mm	30 x 160 x 50 mm		
Washcoat	ALO				
Active metal	Pt, Pb	Pt	Pt, Pd		

Table 3: Overview over the honeycomb catalyst tested

Explanations: ¹⁾ Cells per square inch (1 CPSI ~ 645 mm²); ²⁾ Temperature that marks start of reactions



Light-off temperature	200°C	not defined yet since the catalysts are prototypes	not defined yet since the catalysts are prototypes
Max. operation temp	650°C	650°C	650°C

Catalyst 1 and Catalyst 3 showed about the same initial pressure drop (<10 Pa) while the initial pressure drop of Catalyst 2 was higher (13.1 Pa, in average for full load operation on day 1). For all 3 catalysts the pressure drop increased with operation time. The increase of the pressure drop could be correlated with the optically determined degree of fly ash deposit build-up on the catalysts inlet surface. Manual cleaning decreased the pressure drop again. For catalyst 1 not all deposits could be removed (the initial pressure drop was not reached again after cleaning). For catalyst 2 and 3 a complete removal of the ash deposits was possible and thus the initial pressure drop could be reached after cleaning.

All 3 catalysts showed high CO emission reduction efficiencies during the first day of operation. Catalyst 1 was with about 94 % (at full load) slightly more efficient than the other two catalysts (about 90 %). The emission reduction efficiency considerably decreased for all three catalysts over time, and cleaning respectively purging with hot air (regeneration) showed no positive effect as shown for catalyst 2 in Figure 28. The CO reduction efficiency at the end of the testing periods decreased to 50 % for catalyst 1, to 60 % for catalyst 2 and to 40 % for catalyst 3 respectively.



Figure 28: Long term performance of honeycomb catalyst 2 regarding emissions and pressure drop Explanations: manual cleaning of the catalyst with compressed air after 11th day of operation

All 3 catalysts showed moderate OGC emission reduction efficiencies during the first operation day. Catalyst 2 was with about 46 % (at full load) significantly more efficient than the other two catalysts (19 % and 29 % for Catalyst 1 and 3). The emission reduction efficiency significantly decreased for catalyst 2 (down to 16 %) and 3 (down to 22 %) while it surprisingly increased for catalyst 1 (up to 33 %). Cleaning respectively purging with hot air (regeneration) showed no positive effect. The higher Pt-content of catalyst 2 in comparison to catalyst 3 seems to improve the initial OGC-emission reduction efficiency but after 2 weeks almost no differences occurred. Unfortunately, the exact composition of the catalytically active material of Catalyst 1, which showed the best OGC emission reduction efficiency, is not known. The share of CH_4 on the OGC emissions increases downstream the catalyst up to 90 % as it is well known that CH_4 is hardly converted by the catalyst. Therefore, the evaluation of the methane free OGC reduction showed a significantly higher emission reduction under the consideration that CH_4 is not converted by the applied metal based catalysts.

A deeper evaluation of the 3 catalysts investigated has been performed in order to clarify why the catalysts get partly de-activated so quickly and cleaning does not improve their activity anymore. Therefore, wetchemical analyses of selected deposit samples as well as SEM/EDX analyses of the catalyst surface have been performed in order to probably understand the reasons for deactivation. The performed chemical analyses as well as the SEM/EDX analyses clearly indicated that the catalysts have been deactivated by aerosol deposits (condensation), mainly K_2SO_4 and KCI, which have partly blocked the active centres of the catalysts. Therefore, manual cleaning of the dust did not show an effect on the regeneration of the reduction



efficiency.

After an intense discussion together with the manufacturer it has been decided to design a new catalyst (based on a foam ceramic) which can be applied at higher temperatures (up to 800 °C) and which shall be mounted at the outlet of the main combustion chamber where aerosol condensation should not occur or be of minor relevance.

Results of long-term testing of foam ceramics (mounting position II). Test runs with a non-coated and two catalytically coated foam ceramics (Tailor-made catalyst I and II) as well as a test run with the stove without integrated foam ceramic have been performed (see

Table 4). The evaluation of the stove operation data showed, that all test runs have been performed under well comparable and representative combustion conditions. The foam ceramics showed no effect on the efficiency of the stove (as expected). The non-coated foam ceramic showed no emission reduction efficiencies regarding CO, OGC and TSP and showed no relevant influence on the stove operation (except the increased pressure drop).

Table 4: Overview over the foam ceramics tested

Explanations: ¹⁾ cells per square inch (1 CPSI ~ 645 mm²); ²⁾ Pt content of tailor-made catalyst II higher than Pt content of tailor-made catalyst I

No	1	2	3	
Name	Non-catalytic foam ceramic	Tailor-made catalyst I	Tailor-made catalyst II	
Substrate	SSiC	SSiC	SSiC	
Structure	Foam ceramic	Foam ceramic	Foam ceramic	
	10	10	10	
	10	10	10	
Dimension (HxWxL)	380 x 50 x 50 mm	380 x 50 x 50 mm	380 x 50 x 50 mm	
Active metal	No active catalyst	Pt 2)	Pt 2)	

The catalytically coated foam ceramics showed a higher initial pressure drop (+8.7 Pa at full load) compared to the non-coated foam ceramic due to the coating of the foam ceramic with the wash coat and the catalyst (free cross-section of channels somewhat reduced). For all three foam ceramics the pressure drop increased with operation time. For the non-coated foam ceramic only a slight increase of the pressure drop could be observed (from 17.0 to 17.5 Pa). For the catalytically coated foam ceramics a slightly higher increase of the pressure drop was measured (from 26 to 29 Pa after 2 weeks for catalyst 1 and from 24 to 27 Pa after 2 weeks for catalyst 2 respectively). The increase of the pressure drop seems most likely to be due to the optically determined fly ash deposits built-up on the surface of the foam ceramics. Manual cleaning decreased the pressure drop again. The ash deposits could be successfully removed and the initial pressure drop could be reached after cleaning. Manual cleaning of the foam ceramic at least every two weeks of operation would be necessary in order to stabilise the pressure drop (based on the test run results so far).

Both catalysts showed high CO emission reduction efficiencies during the first days of operation (of about 90 %). The emission reduction efficiency considerably decreased for both catalysts, and manual cleaning showed no positive effect as shown for catalyst I in Figure 29. The CO reduction efficiency decreased to 73 % for catalyst I and to 69 % for catalyst II respectively. However, the reduction efficiencies have been still sufficiently high after 3 weeks of operation.





Figure 29: Long term performance of the foam ceramic catalyst I regarding emissions and pressure drop Explanations: manual cleaning of the catalyst with compressed air after 11th day of operation

Both catalysts also showed good OGC emission reduction efficiency during the first days of operation. Catalyst II was with about 52 % (at full load) slightly more efficient than catalyst I (about 48 %) probably due to the higher Pt doping. The emission reduction efficiency significantly decreased for catalyst II (down to 27 %) while it only slightly decreased for catalyst I (down to 38 %). Manual cleaning of the foam ceramic showed no positive effect. The higher Pt-content of catalyst II in comparison to catalyst I seems to improve the initial OGC-emission reduction efficiency but after 3 weeks the reduction efficiency of catalyst II was considerably lower than for catalyst I.

In conclusion, the catalytically-coated foam ceramic I showed sufficiently high and rather stable emission reduction efficiencies regarding CO and OGC, and therefore this catalyst seems basically to be suitable for logwood fired stoves. Tailor-made catalyst II will not be further considered (also due to the higher costs regarding Pt doping). However, the pressure drop over the coated foam ceramic is quite high and it moderately increased after two weeks of operation due to fly ash deposits on the surface of the foam ceramic. Although the performance of the catalyst seems to be satisfactory so far, the pressure drop of the foam ceramic is currently too high for natural draft systems and has to be considerably reduced. By changing the geometry of the ceramic structure or by applying a foam ceramic with wider pores the tailor made catalyst I seems to be suitable for the implementation into logwood fired stoves in principle.

Conclusions. The implementation of a high temperature catalyst at the outlet of the post combustion chamber (temperature range of about 500 °C) is not recommended as tests showed unstable reduction efficiencies. The decreasing reduction efficiencies over time can most likely be attributed to catalyst deactivation as a consequence of blocking of active centres caused by aerosol condensation. Therefore, the mounting position of the catalyst has to be carefully evaluated in terms of existing flue gas temperatures in order to minimize risks of aerosol depositions (due to condensation).

High temperature catalysts, which are mounted at the outlet of the main combustion chamber (temperature range 600 - 800 °C) showed sufficiently high emission reduction efficiencies regarding CO (69 - 73 %) and OGC (27 - 38 %) and seem basically to be suitable for logwood stoves. However, the emission reduction efficiency decreased for the catalysts over the testing period of about 100 hours of operation and manual cleaning showed no positive effect (e.g. the CO reduction efficiency decreased from 90 % (first day) to 73 % within the testing period).

Tests over a complete heating period would be needed to enable an evaluation of the long-term performance of catalysts in wood stoves as well as the possible need of cleaning. Furthermore, catalysts need enough surface area to achieve sufficient reduction efficiency. This is usually provided by narrow channels which cause a certain pressure drop. The pressure drop is usually too high for an operation of the stove with natural draught only. Therefore, either a flue gas fan is needed if a catalyst should be integrated or the dimension of the catalyst needs to be increased. In general, the mounting position of integrated catalysts has to be carefully evaluated in terms of operating conditions (existing temperature), materials used and the availability to clean the catalyst.



2.3 Concepts for the optimised implementation of a mesh catalyst into a low emission stove (RISE/Nibe)

Choice of catalyst and evaluation procedure. The mesh catalyst type was selected with regard to promising test results in a previous study and therein specified advantages such as easy adaption to an existing or new stove design, low space requirement, good mechanical durability, easy cleaning procedure and the aim of generating only little flow resistance. The evaluated catalyst has a high temperature steel mesh base, with a mesh diameter and opening of about 0.5 mm resp. 1.24 mm, and a total cross section 0.2 m^2 , split into 8 pieces at ø 180 mm. The active material was a mixture of stabilized Ce-Oxide and stabilized platinum. Size and coating properties were chosen in consultation with the manufacturer on the basis of expected flue gas conditions regarding volume flow, emissions, etc. and the available space in the catalyst test rig.

The evaluation was divided into two parts, at first a comprehensive study in a catalyst test rig on catalyst properties itself and secondly test runs with a stove integrated catalyst. The set-up of two test stands and the mesh catalyst itself are shown in Figure 30. The catalyst test rig comprised a traditional stove as emission source, a heated flue gas tract to adjust the gas temperature at the catalyst and two identical measuring sections up- and downstream a catalyst box, where the test object was placed. This set-up allowed for simultaneous measurement of gaseous components and particles at adjustable catalyst conditions. The mesh catalyst was studied at different temperatures and over a longer time period of about 150 hours in total including the check of light-off conditions and the impact of aging and cleaning. Additionally, tests with reduced area (fewer mesh) and comparison with commercially available catalysts have also been performed. For the second part of the evaluation the catalyst was tested within a stove to study the impact of catalyst integration on overall stove operation. The test set-up comprises a traditional stove modified with a new socket for holding the catalyst mesh. The stove was operated according to the project's "close-to-real-life" test method without the catalyst (reference case) and with two catalyst alternatives. The test run with the first catalyst alternative, i.e. "Catalyst (2)", where two mesh pieces (equalled about 18 % of original catalyst area) were placed directly above each other, was operated with the same stove settings as in the reference run. The test run with the second catalyst alternative, i.e. "Catalyst (4)", where four mesh pieces (about 35 % of original catalyst area) were placed with 3 mm spacers in between, was operated with adjusted damper settings in order to match the air flow of the reference case.



Figure 30: Catalyst test rig (left); mesh catalyst (new, in test rig, aged), new stove socket and stove integrated catalyst test set-up (right) including placement of mesh pieces (right, below)

Result evaluation in catalyst test rig. The ability of the mesh catalyst for a significant reduction of gaseous emissions was demonstrated. The light-off temperature for CO conversion was around 250 °C, with nearly complete elimination of carbon monoxide at temperatures above 300 °C, independent of CO level or other boundary conditions. The reduction rate for hydrocarbons was in range 25 - 50 % for moderate hydrocarbon contents, reaching up to 70 - 80 % at high hydrocarbon levels. An example for the catalyst performance in the test rig is shown in Figure 31 with the trends for temperature and gaseous components up- and downstream the catalyst. A significant reduction of particles could also be observed. The reduction rate was



usually in rage 20 – 50 %, further increasing at batches with large hydrocarbon levels and reduction rates. In large part the particle reduction is based on minimizing particle forming hydrocarbons, but to some extends as well on particle deposit on the catalyst surface. The reduction rates for gaseous emissions and particles seemed to remain unchanged during the evaluation period, indicating no impact of aging or cleaning procedures. Due to the mesh properties (low free cross sections) and the catalyst size and positioning (8 mesh pieces stacked above each other) a noticeable flow resistance (pressure drop) has been measured. This pressure drop even further increased "temporarily" and "permanently". The temporary increase occurred when running over a long time at low catalyst temperatures. It could reach large numbers and was based on increased catalyst blockage due to particle deposits. When reaching higher catalyst temperatures this blockage was dissolved again, due to the starting carbon conversion in the deposit, a sort of self-cleaning. The permanent increase in flow resistance summed up to doubling the pressure drop within the aging period of about 120 h (where the catalyst was operated at varying temperature levels) and was based on permanent catalyst blockade by ash particles. The removal of this deposit through cleaning restored initial flow resistance conditions.





Reducing catalyst area by reducing the numbers of mesh pieces had a clear effect on the flow resistance. To put it roughly, by cutting the area in half (4 mesh instead of 8 and so on) the pressure drop was also reduced by half. This is an indication for the benefits of a larger catalyst cross section when aiming for lower flow resistance without having to lose reduction capacity (at least for particles there also could be a negative impact of that measure). Observing the reduction capacity for gaseous emissions and particles the effect of catalyst area decrease mainly became obvious when tests were performed with large area reduction (>= 75 % reduction). There was, for example, still a nearly complete elimination of CO at 50 % area, while at 25 % area CO conversion had only decreased to 90 - 95 %. This means the catalyst seems to be somewhat oversized for exposed flue gas volume and emission levels.

Result evaluation of stove integrated catalyst. Integrating the catalyst into the stove had a significant impact on the combustion conditions in the stove itself. The catalyst's additional pressure drop will cause a lower air flow when damper settings are not modified. That results in worse conditions for wood ignition at recharge and longer batch duration. Therefore the damper settings were modified for the Catalyst (4) test run. Another noticeable impact is the increase in CO_2 (CO conversion) at the end of a batch, which delays the recharge time (when following the test method's CO_2 recharge criteria) and thus resulting in lower combustion chamber temperatures and less depth of char bed at recharging.

It could also be observed that the chosen location of the catalyst was not optimal. The catalyst temperature dropped below the light-off value at recharging, resulting in a decrease in reduction at the beginning of each



batch. This prevented the catalyst to operate to its fullest potential, especially since the time after recharging is usually the time with the highest hydrocarbon emissions. Due to the chosen location the catalyst did not operate longer times at higher temperatures, thus neither an eventual conversion of short-chain hydrocarbons (e.g. methane) nor a proper self-cleaning could be accomplished, probably leading to faster blockage and shorter cleaning intervals.

Despite the stated negative impacts of catalyst flow resistance and non-optimal placement, a significant improvement on emissions could be observed comparing to the reference test run and even more when comparing to emission values upstream the catalyst. Regarding carbon monoxide a reduction of almost 60 % for Catalyst (2) and 90 % for Catalyst (4) could be achieved when comparing final numbers to the reference run. Comparing to upstream catalyst values the CO conversion for the Catalyst (2) run is even higher at around 65 %. And an altered catalyst location would have given even better results. The same is true for hydrocarbon emissions, for which there is almost a 30 % reduction for the Catalyst (4) test run compared to reference, despite the flaws in catalyst placement. In contrast the Catalyst (2) test run shows a more than 10 % increase for hydrocarbon emissions compared to reference, but a 20 % reduction compared to upstream values. According to the particle samples for the complete test runs the Catalyst (4) test showed a clear 40 % reduction, which seems to be at least partly caused by the reduced air flow during the first batches - compared to reference. And looking at the single batch samples, there is even an indication for reduction potential of the Catalyst (2) alternative. Finally, due to the decrease in chemical (CO conversion) & thermal losses (mainly due to reduced air flow during first batches) there is also an increase in test run efficiency when using the catalyst. A comparison of emissions and efficiency for the reference run without catalyst and the two catalyst alternatives is shown in Figure 32.





Conclusion. The thin metal mesh form of the catalyst provides large design opportunities for integration into a stove. The evaluation has demonstrated the significant reduction capacity for gaseous emissions and particles. The catalyst will also act as a safety device for severe combustion phases, since reduction rates even increase at times with bad combustion & high emissions (for example after user induces errors in operation). During the first 200 hours of operation no signs of deactivation have been observed and a simple cleaning procedure restored initial flow resistance conditions. Most importantly, catalyst positioning is crucial. The catalyst has to be placed to enable fast heat-up and an operation at required temperatures. In particular a drop below light-off temperature at recharging has to be prevented. Nevertheless prevented neasy access has to be given for the stove operator to enable cleaning and/or replacement. Keeping the catalyst area as minimal as needed, i.e. the prevention of oversizing, will be beneficial regarding catalyst costs. This will also help to lower the flow resistance, which can additionally be influenced by finding a location where a large cross section is possible.



2.4 Evaluation of foam ceramic filters or their replacement by a catalyst insert (TFZ)

In the following the performance of catalytic and non-catalytic foam ceramic elements for insertion into existing stoves is evaluated.

Materials and method. To verify if the operation time of foam ceramic filters in stoves has a significant influence on the emissions, three foam ceramic filters (Figure 33) with a different amount of passed batches (0, 200 and 550) were provided. The three filters are made of the same raw material, they had a porosity of 35 ppi.



Figure 33: Foam ceramic filters applied: unused element (left), 200 batches (middle), 550 batches (right)

An other foam ceramic with acts as a ceramic catalyst (Figure 34) was provided by Linder Katalysatoren GmbH, Germany. The carrier material is a open porous (30 ppi) foam ceramic (SiC – SIO2 + 3C \rightarrow SiC + 2 CO and Al2O3). The manufacturer declares the catalytic coating as a mixture of platinum, rhodium and palladium. The exact ratio of the catalytic components is undisclosed.



Figure 34: Catalytic foam ceramic (left), "Dummy"-element for achieving equal flow conditions in the test rig (right)

To compare the influence of a foam ceramic filter resp. a foam ceramic catalyst on the emissions a "dummy"element (Figure 34) causing a similar pressure drop was manufactured from a 30 mm vermiculite plate. The reason for also using a "dummy" in the trials was to prevent that any possibly positive effect on primary combustion and on gas flow characteristics as caused by the flue gas barrier of the catalyst could falsely be interpreted as catalytic effect. For the validation of the dummy having the same flow characteristics as the catalyst element, a test rig was built to determine the pressure drop over both elements. The vermiculite plate was then drilled with 8 and 10 mm holes until the pressure drop was almost equal to the foam ceramic elements and the catalyst (Figure 35).







The appliance used for the combustion test was a state of the art log wood stove with a nominal heating power output of 8 kW and a room independent combustion air supply. When supplied to the customer, the appliance is provided with a non-catalytic foam ceramic filter. The combustion air can be controlled by a primary and a secondary air flap. Furthermore, there is a diverting flap which allows to by-pass the foam ceramic elements; however this flap was closed for all test runs.

All measurements were performed at the combustion test stand of TFZ in Straubing. Figure 36 shows the applied test rig on which all measurements were performed.



Figure 36: Test stand with flue gas tract for flue gas emission measurements

The combustion appliances were placed on a scale in order to record the mass loss continuously during combustion. Flue gas temperature was measured with a suction pyrometer in accordance to DIN EN 13240 (and with an additional centrally placed thermocouple) it was combined with the gas sampling [1]. The flue gas tunnel for dust sampling was reduced to an effective inner diameter of 64 mm in order to increase the velocity for a reliable isokinetic PM sampling. Gas temperature and velocity near the total dust sampling were continuously recorded for volume flow calculations. The particle sampling was performed following the VDI-Guideline 2066 [2].



For the real life reflecting testing procedure the test protocol as commonly developed for all partners in the project was followed (see chapter 4.1).

Pre-testing of air flow in stove. To test the flow behaviour in the stove and through the foam ceramic elements, pre-tests were executed, they were inspired by tests performed by Aigenbauer et al. [3]. The stove was set under a constant negative pressure of 12 Pa, and the flow rate through the stove as well as the pressure drop over the foam ceramic was logged. Then the leakages were tightened up in 4 steps using air tight tape: Step 1 initial state, Step 2: foam ceramic masked (Figure 37, left), Step 3: all leakages masked and Step 4: cutting the tape from the foam ceramic (Figure 37, right).



Figure 37: Pretesting of the flow behaviour: Step 2 (left), Step 4 (right)

Results on flow behaviour through the stove and foam ceramic. The results from the pretesting (Table 5) show that it is not ensured that the complete flue gas will stream through the foam ceramic while the stove is operated. By comparing Step 2 and Step 4 it becomes apparent that the flow rate and pressure drop over the uncovered foam ceramic (Figure 37, right) is nearly the same as for the foam ceramic masked with air tight tape (Figure 37, left). Therefore it may be assumed that the flue gas is streaming in approximately equal parts through the foam ceramic and through the gaps in the ceramic facing of the stove.

Table 5: Results from pretesting of air flow in stove

Step	Draught	Flow rate	Pressure drop
	Pa	Nm³/h	Pa
1: Initial state	-11.8	35.4	3.2
2: Foam ceramic masked	-11.9	33.9	3.8
3: All leakages masked	-11.8	21.2	9.1
4: Only foam ceramic cut free	-12.0	33.9	3.9

Results on long-term behaviour of non-catalytic foam ceramic elements. In comparison the gaseous emissions for the three foam ceramic filters used (Figure 38) are slightly different but are showing no clear trend relating to the operating hours, neither for full load nor for partial load. The CO emissions are in average around 11 % and the OGC emissions around 13 % higher in partial load operation.





Figure 38: Gaseous emissions using three differently aged foam ceramic filters for full load operation (left) and part load operation (right)

The particle emissions (Figure 39) are slightly different but are showing no clear trend relating the operating hours just as for the gaseous emissions. The particle emissions are in average approx. 6 % higher in partial load operation.



Figure 39: Particle emissions using three differently aged foam ceramic filters for full load operation (left) and part load operation (right)

Generally it can be stated that gaseous and particle emissions measured with the "close to real life" testing cycle (see chapter 4.1) are much higher than the type testing results given on the inspection plate. Thus, the use of a non-catalytic foam ceramic element cannot secure that the strict emission thresholds for type testing will also be met in practical use in the field. This is true for both, particle and gaseous emissions, and it applies particularly when the stove is operated at partial load which happens during transition times or at mild winter temperatures, particularly when the stove power does not fit to the heat demand of the room.

Results using catalytic foam ceramic elements. The catalytic foam ceramic reduces the CO emissions (Figure 40) by about 46 % at full load and by about 47 % in partial load operation, in average. The non-catalytic foam ceramic shows no mentionable reduction of CO emissions.





Figure 40: Comparison of the CO emissions for the foam ceramic filter, the catalyst and the dummy at full load operation (left) and part load operation (right)

When using the catalytic foam ceramic the non-methane OGC (FID signal minus CH_4 from FTIR) emissions are reduced by 21 % at full load and by 23 % at partial load (Figure 41). The non-catalytic foam ceramic filter shows no significant reduction of non-methane OGC emissions.



Figure 41: Comparison of the non-methane OGC emissions for the foam ceramic filter, the catalyst and the dummy at full load (left) and part load (right)

As expected, no significant reduction of the CH_4 emissions could be observed because methane behaves very stable at catalyst temperatures below 650 °C [4]. The same applies for the NO_x emissions, for which the catalyst manufacturer had also claimed some reduction potential.

Total particle emissions (Figure 42) were slightly reduced by 10 % for full load and by 12 % for partial load operation when using the catalytic foam ceramic elements, but the differences may partly also be attributed to measurement uncertainties. This is illustrated by the distinct min-max-bars given for "Filter" and "Dummy".



Figure 42: Comparison of the particle emissions for the foam ceramic filter, the catalyst and the dummy at full load operation (left) and part load operation (right)

The temperatures at the catalyst surface are on average 431 °C for full load and 399 °C at partial load. The average maximum temperature (after refilling) is 543 °C and the average minimum temperature (ignition batch or end of batch) is 264 °C at the catalyst surface. For CO conversion the "light off" temperature



(temperature from where a conversion becomes visible) lies between 200 °C and 350 °C, depending on the mixture of noble metals, the flue gas composition and the age of the catalyst [6][7][8]. These temperatures could easily be reached and they could be sustained almost over the complete measuring cycle of the 8 batches. For methane the "light off" temperature lies between 500 °C and 650 °C [4][8]. In the test runs these high temperatures could only be observed during a very short time frame (for only few minutes after each refilling). The "light off" temperature of total organic carbon lies approx. between 300 °C and 400 °C [4]. But the conversion rate rises with the surface temperature from the "light off" until 800 °C and then may be higher [4]. This means that at an average temperature of 431 °C for full load and 399 °C for partial load the catalyst is just becomes active for OGC-reduction, but the conversion may be optimized by realizing higher temperatures at the catalyst surface.



Figure 43: Minimum, maximum and average temperatures at full load and partial load measured at the surface of the catalytic foam ceramic element.

To figure out the long-term performance of the catalytic foam ceramic some long term testing was performed according to the method described in WP 4. The results of these long term testing's are shown in Figure 44. There is a significant decrease of the reduction rate within 11 days of operating time (each day 8 successive batches). A cleaning of the catalytic foam ceramic with pressurized air (between day 11 and 12) could not restore the initial reduction rate regarding CO, PM and OGC (not shown).



Figure 44: Long-term performance of the catalytic foam ceramic regarding CO emissions (left) and particle emissions (right)

Conclusions. To apply (non-catalytic) foam ceramic elements in a log wood stove has no relevant potential for reducing gaseous and particle emissions. The aging of the foam ceramic does not matter anyway. But the reduction potential of foam ceramic elements (catalytic and non-catalytic) may be optimized by ensuring that the complete flue gas will flow through the foam ceramic and not through gaps in the ceramic lining of the furnace.

The catalytic foam ceramic element reduces CO emissions effectively as the temperatures in the combustion chamber are sufficient to allow high CO conversation rates. To improve the OGC and perhaps also the CH₄ reduction, higher temperatures at the catalyst surface are required. This can be achieved by optimizing the combustion chamber geometry and by insulation or by choosing a better suitable position for catalyst integration.

The long-term stability of the catalytic foam ceramic has to be improved possibly by choosing another



mixture of novel metals to ensure a stable reduction over at least one heating season. However, the decrease of the reduction efficiency over the operation time has to be investigated. After this heating season it should be possible recover the catalyst by cleaning. Otherwise this technology is not of interest for use in log wood stoves.

A detailed report about catalysts is available for download on the website.

References

- [1] DIN EN 13 240 (2005): Roomheaters fired by solid fuel Requirements and test methods, Beuth Verlag, Berlin 2005
- [2] VDI 2066, Part 1 (2006): Particulate matter measurement, Dust measurement in flowing gases Gravimetric determination of dust load. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Beuth Verlag, Berlin 2006
- [3] Stefan Aigenbauer et al. (2011): Endbericht Neue Öfen 2020, p. 63 [online available on: <u>https://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/818948 Neue Oefen 2020 Publizierbarer Endberic</u> <u>ht.pdf</u> (23rd of May 2017)]
- [4] Johanna Carnö et al. (1996): Catalytic abatement of emissions from small-scale combustion of wood, Fuel Vol 75 No. 8, p. 964
- [5] Thomas Nussbaumer (2003): Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction, Energy & Fuels Vol. 17 No. 8, p.1514
- [6] Johanna Carnö et al. (1997): Mixed manganese oxide/platinum catalysts for total oxidation of model gas from wood boilers, Applied Catalysis A: General 155, pp 265-281
- [7] Magali Ferrandon et al. (1999): Deactivation in a wood-stove of catalysts for total oxidation, Catalyst Deactivation 1st Edition, pp 423-426
- [8] Magali Ferrandon et al. (1999): Thermal stability of metal supported catalysts for reduction of cold-start emissions in a wood-fired domestic boiler, Catalysis Today Vol. 53, pp 647–659

3 WP 3: Increasing efficiency and applicability

Common log wood stoves show a thermal efficiency of approx. 80 % during type testing and an average nominal heat output of approx. 8 - 12 kW. But in new and well insulated or renovated houses the heat demand of the room where the stove is integrated is usually much lower and partial load operation happens frequently. Tests in the EU-project "beReal" had shown that in practice the efficiency is largely lower and the heat output is even higher than determined during type testing. To increase the applicability for log wood stoves in future buildings, a heat exchanger based on phase change material (PCM) was developed, in order to reduce the nominal heat output and to improve the user comfort (see section 3.1). Furthermore, it was the aim to prove that higher efficiencies could also be achieved with conventional stoves in practice, this potential was evaluated by determining the avoidable standing losses (section 3.2) as well as the influence of too low and too high draft on efficiency and emissions, the corrective technologies were therefore also evaluated (section 3.3 - 3.5).

3.1 Concept for the integration of a heat storage system based on a phase change material into a low emission stove (BIOS)

As a first step a detailed evaluation of PCMs available on the market based on literature reviews and data from manufacturers has been performed. Promising PCMs have been summed up in a short-list and have been further evaluated in terms of costs, thermodynamic properties, heat capacity, density, toxicity, flammability and temperature degradation. Primarily, a high density and heat capacity of the PCM is important as the heat storage unit should be realised in a compact way. The evaluated PCMs have to be suitable for the application in a heat storage unit (e.g. flue gas heat exchanger) of wood stoves. Accordingly, some basic criteria limit the applicability of these PCMs. These criteria were defined as follows:

- Melting temperature: 150 300 °C
 - Should be determined in a way that complete melting can be achieved within a representative number of batches. This can be evaluated by CFD simulations.
- Degradation temperature: > 600 °C
 - Maximum achievable temperature of stove materials can be evaluated by CFD simulations and depends on the isolation applied (see chapter 4).
- The price should be as low as possible in order to be economically competitive.
- The material should not be corrosive or toxic under operation conditions.



Based on the evaluation performed promising PCMs (salt mixtures) have been selected for the PCM heat exchanger. In a next step an appropriate heat exchanger for heat transfer from the flue gas to the PCM (loading cycle) and for heat transfer from the PCM to convection air (unloading cycle) has been designed and integrated into the low emission stove concept developed within WP 2 (see section 2.1). The PCM heat exchanger should be integrated into the stove concept in a way that a large share of the energy produced is transferred to the PCM in order to ensure high storage efficiency. The basic concept of the PCM heat exchanger is shown in Figure 45.



Figure 45: Scheme of the PCM heat exchanger concept with convective air channels

The release of the heat stored (unloading cycle) can be realised

- via convection air channels which are opened at the end of operation of the stove. Thus, the stored heat can be distributed even to different rooms (see Figure 45).
- via slow natural convection over a larger time duration which is of advantage for the comfort of living.

The development of the PCM heat storage device has been accompanied and supported by CFD simulations in order to evaluate the performance of the heat storage device. By applying CFD simulations the stove including the heat storage geometry can be optimised more effectively than by trial-and-error test runs.

BIOS has developed an innovative CFD model for wood log fired stoves operated in batch mode consisting of an empirical model for wood log combustion and CFD models for the turbulent reactive flow and heat transfer in the stove [1]. However, the combustion of wood logs in small-scale stoves is a highly transient and complex process, as a wood log stove is operated in batch mode with every batch consisting of a starting, a main combustion and a burnout phase. The transient character of the operation of wood log stoves becomes even more important, when a heat storage system is included. In this case, steady-state conditions do not apply, as the operation of a heat storage device is divided into 3 phases: heat-up, heat storage (without charging) and heat release (discharge). Therefore, BIOS has developed an innovative CFD simulation methodology including a transient simulation of the system [2]. Thus, it is possible to derive and discuss the thermal behaviour of a heat storage device coupled to a wood log fired stove during the heat-up and discharge phase. Moreover, the influence of the air-flow in the discharging channels and the flue gas flow in the charging channels as well as material properties on the charging/discharging processes can be evaluated.

In Figure 46 the surface temperatures of the PCM heat storage unit (similar to Figure 45) and in Figure 47 the flow conditions through the PCM heat storage unit, laterally coupled to the new Low-emission stove (on both sides), are depicted as examples.





Figure 46: Iso-surfaces of material temperature [°C] in the PCM heat storage unit (steady state after complete charging); 3D view from the left and right hand side of the air channels

The CFD simulations show a rather even flow of the flue gas through the heat exchanger modules indicating a good utilisation of the heat exchanger. The maximum temperature of the PCM achievable is close to 480 °C, which is significantly lower than the degradation temperature of the selected PCM. The highest temperature occurs at the flue gas inlet into the tubes. In the bottom and top of the heat exchanger modules the temperatures are lower. The minimum temperature of the PCM can be up to 260 °C which is well above the melting temperature of the selected PCM, indicating that complete melting of the PCM is possible. The evaluation of the heat storage potential as well as of the efficiency of a stove with integrated PCM has already been discussed in section 2.1. The results show that more than 50 % of the useful heat can be stored in the stove and the PCM heat exchanger and efficiencies above 92 % are achievable.



Figure 47: Iso-surfaces of the flue gas and convection air velocities [m/s] in the PCM heat storage unit (steady state after complete charging)



Conclusions. A concept of an appropriate heat exchanger for heat transfer from the flue gas to the PCM (loading cycle) and for heat transfer from the PCM to the surroundings (unloading cycle) has been developed and integrated into the new low emission stove. The PCM heat exchanger concept has been developed by means of CFD simulations. Based on the development work a prototype of the stove with integrated PCM heat exchanger has been constructed and tested. Due to the optimised positioning and improved insulation of the PCM heat exchanger a high efficiency of the stove (> 92 %) and an efficient heat storage in the PCM heat exchanger can be achieved which has also been proven by test runs performed.

References:

[1] Scharler R., Benesch C., Neudeck A., Obernberger I., 2009: CFD based design and optimisation of wood log fired stoves. In: Proc. of the 17th European Biomass Conference, June 2009, Hamburg, Germany, ISBN 978-88-89407-57-3, pp. 1361-1367, ETA-Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy

[2] BENESCH C., BLANK M., SCHARLER R., KOESSL M., OBERNBERGER I., 2013: Transient CFD Simulation of Wood Log Stoves with Heat Storage Devices. In: Proc. of the 21st European Biomass Conference and Exhibition, June 2013, Copenhagen, Denmark, ISBN 978-88-89407-53-0 (ISSN 2282-5819), pp. 578-584, (paper DOI 10.5071/21stEUBCE2013-2CO.7.1), ETA-Florence Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy

3.2 Determination of standing losses of stoves and their prevention (TFZ)

In stove combustion the chimney draught still remains active over a long time after termination of combustion. This is due to the fact that both, stove and chimney still remain warm for several hours. Furthermore, the temperature gradient between the inside of the building and ambient air persists even though stove and chimney may both have cooled down completely. As a result, a certain chimney draught is sustained throughout the complete heating season even if the stove is not used at all. If air supply is then not shut down – as given for most stoves – continued heat losses are inevitable as the building remains heated (e.g. by central heating).

Two types of standing losses were investigated: heat losses though the chimney without any heating operation (cold standing losses) and the post heating losses (losses during chimney cool down).

Equipment used. Three log wood stoves were chosen for measurements of cold standing losses, all were equipped with a central air inlet socket. Stove A was a room sealed stove Hark 44 GT ECOplus with 8.0 kW nominal heating power. It was equipped with an integrated foam ceramic element for particle emission reduction. Three dampers allowed for manual adjustment of either primary or secondary air, or enabled the opening of a bypass around an integrated foam ceramic filter element; this was to ensure a safe ignition and an operation during phases of low chimney draught or filter clogging.

Stove B was a log wood stove Scan 85 2013, type 85-2, with 8.0 kW nominal heating power. Air dampers were adjusted by a single-lever mechanism for combined primary and secondary air adjustment.

Stove C was a log wood stove Buderus Blueline, type No. 10, with 8.0 kW nominal heating power. Air dampers were adjusted individually for primary and secondary air supply.

All 3 stoves were mounted to a chimney of 130 mm inner diameter. It was made of stainless steel and had a total height of 12.5 m with 1.7 m in outdoor environment. The chimney was equipped with several sensors (Figure 48).





chimney. Four different damper positions of the stove were applied sequentially:

1 = Primary air: max; secondary air: max; bypass open

2 = Primary air: min; secondary air: max; bypass open

3 = Primary air: min; secondary air: max; bypass closed

4 = Primary air: min; secondary air min; bypass closed

During this time the usual fluctuation of the natural draught conditions was accepted. A recording of the conditions during the monitoring phase is presented in Figure 2. It shows, that ambient temperatures were usually between 0 and 10 °C and wind velocity fluctuated between 0 and 4 m/s. As consequence the natural chimney draught was largely determined by these factors, while it hardly fell below -4 Pa it could easily reach peaks of -40 Pa, particularly during periods of elevated wind speeds. As a result the measured volume flow though the cold chimney follows the same pattern as given for the chimney draught (Figure 49).





Figure 49: Measured parameters during monitoring program for cold standing loss estimation at the four damper positions applied with Stove A

With the two other stoves the procedure was similar. For Stove B three different damper positions were chosen:

- 1 = fully open,
- 2 = intermediate position (normal combustion),
- 3 = fully closed.

And for Stove C the damper positions were:

- 1 = Primary air: max; secondary air: max,
- 2 = Primary air: min; secondary air: max,
- 3 = Primary air: min; secondary air: min.

The duration of each test is given in Table 6. All monitoring periods were conducted under quite similar climatic conditions during mild winter days in 2015.

Table 6: Monitoring duration of cold stoves at natural draught chimney (duration in days)

Sto	ve A	Sto	ve B	Sto	ve C
Damper		Dampe	r	Dampe	r
position	Duration	positior	Duration	positior	Duration
1	4.0	1	30.1	1	8.8
2	4.2	2	5.0	2	3.1
3	5.8	3	8.6	3	2.5
4	2.8				

Procedure for losses during chimney cooling. For these tests the same setup was used but tests were executed with only one log wood stove (Stove A). A heating cycle of 5 full load batches followed by 3 partial load batches was applied. This heating cycle was repeated over 13 testing days. At the end of each such heating cycle the air flaps were either fully closed (in 6 tests) or they remained in the last heating position (in 7 tests). The monitoring period of the cooling phase lasted over 12 hours (i.e. overnight).



Calculation. Mean chimney temperature $\overline{T}_{chimney}$ was calculated as mean value from the three sensor positions T2 to T4 as indicated in Figure 1. Cold standing losses via chimney were calculated according to the following equation:

 $\dot{Q}_{chimney} = \dot{V}_{air} * \bar{\rho}_{air} * \bar{c}_{p_{air}} * \left(\bar{T}_{chimney} - T_{ambient}\right)$

where $\dot{Q}_{chimney}$ is the calcuated heat loss rate through the cold chimney (in W), \dot{V}_{air} is the air volume flow in the chimney (in Nm³/s), $\bar{\rho}_{air}$ is the mean density of air (in kg/m³) calculated at given temperature (calculated as mean value of $\bar{T}_{chimney}$ (i.e. the mean chimney temperature) and $T_{ambient}$ (i.e. the ambient air temperature measured at the rooftop) in °C.

The calculation regarding the standing losses for the hot chimney are made using the same equation.

Results on cold standing losses. During the relatively mild winter period 2015 the measured the average cold standing losses of the log wood stoves via the cold chimney was between 19 and 75 W (Stove A) or it was between 27 and 56 W for Stove B. For Stove C the range was from 17 to 44 W. This is shown in the results presented in Table 7.

Table 7: Cold standing losses using Stoves A, B and C without heating operation, calculated over full the measurement duration (n.a. = not available)

Stove/damper	Chimney	Flow rate	$\overline{T}_{chimney}$	$T_{ambient}$	Q _{chimney}	Monthly heat loss
position	draught	\dot{V}_{air}				(calculated)
	[Pa]	[m³/h]	[°C]	[°C]	[W]	[kWh]
A/1	-4.5	13.9	19.0	2.8	74.7	53.8
A/2	-5.8	11.5	19.4	3.5	60.7	43.7
A/3	-6.0	11.9	21.3	4.2	68.3	49.2
A/4	-6.2	4.3	21.8	8.4	19.0	13.7
B/1	-9.7	10.1	21.4	5.0	55.5	40.0
B/2	-6.8	7.0	20.5	4.4	37.6	27.1
B/3	-9.6	4.5	20.6	2.5	27.1	19.5
C/1	n.a.	8.3	20.2	4.3	44.0	31.7
C/2	n.a.	4.4	21.2	7.1	20.9	15.1
C/3	n.a.	2.8	21.3	3.2	16.7	12.0

Maximum heat loss flow was recorded when all dampers were kept open (see A/1, B/1, C/1 in Table 7). For Stove A differences were low when either primary or secondary air were kept open (Positions 2 and 3); only when all dampers were closed there was always a significantly reduced air flow which created only low loss rate of between 17 and 27 W in average.

Calculated on a monthly basis this lowest loss rate of Stove A would amount to a heat loss of approximately 14 kWh. An equivalent of about 4 kg of wood fuel would be required to compensate for this monthly loss. For the highest loss rate (Stove A at damper position 1) an aggregated monthly cold standing loss of 54 kWh is calculated, it would be compensated by the use of about 16 kg of wood fuel.

Results on losses during chimney cooling. If the stove is operated occasionally, additional heat losses will occur. This was tested by the use of Stove A only. In Figure 50 from two testing days are displayed, it shows the differences between an operational mode with and without a closure of both air dampers after the last batch. When both dampers remain in the same position as during combustion, the temperature of both, stove and chimney, rapidly declines (see dotted line) while a closure of dampers will immediately reduce the flow through the chimney (continuous line) and as a consequence this will prevent convection losses. In Table 8 the results from all 5-h-cooling phases observed during 12 testing days are compiled and sorted in ascending order of the respective chimney draught. It shows that the range of climatic conditions during the tests were quite similar for both settings; they are thus reflecting a typical range of heating days in Germany. It is also shown that the level of mean chimney flow velocity is drastically reduced by about 60 to 70 % when all dampers are shut after combustion.





Figure 50: Cooling performance of Stove A at operational mode "closed" (= both dampers are closed after batch 8) and "open" (both dampers are left open after batch 8)

However, there is still a remaining flow, which is either a deliberately realised flow (for safety reasons) or it can be attributed to leakage air intake from an untight stove construction. The post heating losses within the assumed 5-h-cooling phase are shown in Figure 51 as a function of the respective chimney draught. There is a clear correlation which follows a similar pattern as also given for the correlation between chimney flow velocity and chimney draught (see data in Table 8). The fact that the heat losses in Figure 51 did not follow a steady linear increase can be attributed to chimney draught fluctuations which are not easily reflected by the calculated mean value over the 5 h observation period. Additional sources of variation could be either an inconsistency of stove tightness or of the damper positions at closure.

Table 8: Operational conditions and measurement results with Stove A on heat losses during cooling phase

 (5 h) after combustion (trials sorted by natural chimney draught under given climatic condition)

		Dam	Damper settings after heating operation: "open" (O)				Damper settings after heating opera "closed" (C)					
		01	O2	O3	O4	O5	O6	C1	C2	C3	C4	C5
Mean heating power losses in post heating phase (5 h)	kW	0.6	0.8	1.0	0.9	1.1	1.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
Total of post heating losses	kWh	2.8	4.0	4.9	4.7	5.6	5.4	1.1	1.5	1.5	2.1	1.9
while cooling (5 h) Mean chimney temperature	°C	6.6	24.3	13.8	16.7	4.8	10.7	14.3	14.6	17.4	11.2	17.9
while cooling (5 h) Mean stove temperature	°C	62.1	96.3	92.3	88.6	82.5	79.8	74.6	85.2	94.5	96.0	93.4
while cooling	°C	64.4	120.9	121.2	110.1	95.7	85.1	99.8	106.5	140.8	155.1	132.1
Mean chimney flow velocity	m/s	0.63	0.8	0.92	1.0	1.09	1.24	0.19	0.26	0.2	0.3	0.4
Mean chimney draught Mean atmospheric	Ра	-3.9	-20.3	-23.3	-27.7	-33.1	-42.5	-5.3	-6.9	-21.3	-26.3	-29.3
pressure	mbar	974	978	991	988	970	962	984	969	985	994	987



From Table 8 the mean post heating losses are 4.6 kWh (damper settings "open") and 1.9 kWh (damper settings "closed"). Thus, with Stove A the total directly avoidable post heating losses are around 2.7 kWh. It can be assumed, that there is a high potential for further reducing the avoidable post heating losses. Such reduction could be achieved by applying fully tight air flaps on a central air intake socket while at the same time the stoves should also be highly airtight towards the heated room.





Techno-economic evaluation of standing losses. A model calculation was performed using the measured post heating losses as presented above. It was assumed, that the heating period will last from October until April (i.e. 213 days). For Stove A the usual damper position after a heating cycle would be Position 3 (see equipment used). In this position cold standing losses of 68.3 W were determined (see Table 7) and post heating losses are 4.6 kWh per heating cycle (average of damper setting "open" in Table 8). In an operation with air dampers closed (Position 4) after terminating the heating cycle, a cold standing loss flow of 19 W was assumed while the mean post heating losses were 1.9 kWh per each heating cycle.

With these input data the total standing losses were calculated as shown in Figure 52.



Figure 52: Aggregated total standing losses as a function of the number of annual heating cycles (calculated on measurement results for Stove A)

Figure 52 shows that, given the assumption of the air dampers remaining in the last heating position (which may be regarded as a highly probable case in practice), and with an estimated number of 100 heating cycles



per year, the annual heat loss using Stove A amounts to 750 kWh. The heat loss in this example corresponds to approximately 0.5 m³ of staked hard wood logs. If this heat loss shall be replaced by an ordinary heating oil boiler, having an annual efficiency of 85 %, Stove B would then cause additional heating costs in the order of around 62 \in /a due to leakage flow through the chimney (at an assumed oil price of 0.66 \in /I).

Significant reduction of two thirds of these losses were demonstrated by closing the air dampers after heating operation (Figure 52), although this closure seems to be rather unlikely in practice as the stove burnout usually happens overnight. But even then some losses would remain, they must be accounted to a non-air-tight stove construction and to the fact that even with fully closed air dampers some air may be allowed to enter the stove via the air inlet socket (e.g. for complete coal burnout). Thus, further reduction potential is given by a fully automatic shutdown of the air supply. This could be performed by control systems or also be realized by retrofit flaps with electronical control (see also WP4).

Conclusions. Both, room heat and such heat which is still stored in a stove can easily be exhausted through the chimney of a log wood stove; this can account for notable heat losses which are usually not evaluated in stove tests. Modern stoves with automatic combustion air inlets can reduce such heat losses to a minimum by closing the air supply or the flue gas connection when the stove has cooled down to a given temperature level.

Heat losses through chimneys after termination of heating operation should generally be regarded in economic viability calculations for additional stove features such as automatic air inlet flaps. However, it should also be clarified if a complete closure of air inlet flaps is compliant with given legal safety restrictions.

References: [1] Rawe, R. et al. (2004): Energieverluste von Gebäuden infolge Luftströmungen durch Abgasanlagen Einsparungen durch Abgasklappen, Fachhochschule Gelsenkirchen

3.3 Evaluated concepts for stove draft stabilization

The results from the evaluation of draught stabilizers are presented together with the semi-automatic stove control devices (see chapter 1.6). This was deemed useful due given functional similarities with retrofit flue gas flow control devices and combustion air control devices.

3.4 Summary on chimney draught impact on emissions and efficiency

Comprehensive investigations on stove performance as a function of chimney draught had been performed in previous projects. The results were comprehensively presented and discussed in the consortium. In the following the main results can be summarised for this report.

As shown in Figure 53 the influence on CO and OGC emissions by applying different chimney draughts is highly stove dependant. Depending on the flue gas flow properties and the air distribution, the gaseous emission increases or decreases with higher chimney draught.



Figure 53: Influence of different chimney draught applied to stove a (left), stove b (middle) and stove c (right) on CO and OGC emissions

The influence of chimney draught on particle emissions follows no clear trend (Figure 54). It seems that the particle emissions rather remain stabile.





Figure 54: Influence of different chimney draught applied to Stove A (left), Stove B (middle) and Stove C (right) on particle emissions

Regarding the efficiency, all tested stoves are sowing the same trend (Figure 55). The efficiency is decreasing significantly at higher draught pressure levels.



Figure 55: Influence of different chimney draught applied to Stove A (left), Stove B (middle) and Stove C (right) on efficiency

3.5 Potential for fan stabilized combustion (RISE/Nibe)

Insufficient draft at stove operation will result in insufficient air supply to the combustion chamber, which causes incomplete combustion and therefore increases hazardous emissions released into the atmosphere. The most critical timeframe of stove operation is the ignition phase, when stove and chimney are cold. This results in a fast flue gas cool-down which minimizes the natural draft induced by temperature differences to ambient air. This problem has been reported in literature, primary when the stove was connected to an existing large masonry chimney.

Problems with insufficient draft can also occur when secondary measures create a large flow resistance across the stove. As already reported in the chapter before, filters and catalyst can cause such a large pressure drop, which will even increase during operation due to particle blockage. Besides impairment of the general combustion conditions this will lead to another critical moment when the door is opened for recharging. At that time the large air flow into the stove will increase flow resistance across the stove even further, thus minimizing natural draft in the chimney. At insufficient draft conditions there will be a higher risk for flue gas backflow during recharging, which poses as an immediate thread for personal health and effect indoor climate. See Figure 56 as an example for this, where the pressure drop across the catalyst increases to more than double when the door is opened.



In order to confirm and quantify problems related to insufficient draft at cold start, RISE conducted comparison tests at various draft conditions. The study was done with the same stove at identical boundary



conditions (cold stove; same wood mass, wood condition and placement in stove) and at four different draft levels: 12, 8, 5 and 2 Pa.

The results of the study can be summarized as follows: At the 12 Pa draft level ignition was quick; the combustion was stable with low emissions and a good charcoal burnout. Already at 8 Pa a decrease in performance could be observed and at low draft levels combustion was really bad (see Figure 57). At 2 Pa, for example, CO emissions were twice as high and OGC emissions even seven times as high as at 12 Pa. Large amounts of soot and tar were formed and the fire was several times close to extinction. This is because at low draft levels the oxygen supply is insufficient to generate the heat needed for drying and pyrolysis.



Figure 57: Comparison of CO & OGC for ignition batch at different draft levels

The tests demonstrated that sufficient draft is essential for a stable combustion with low emissions. It is therefore necessary to take draft conditions already into account during installation and use of the stove. The following risk factors should be considered:

- Low chimney height
- Existing large masonry chimney shall be used for newer stoves. Natural draft will improve with operation time when the chimney is warmed up by the flue gas. Since such masonry chimneys have a large heat capacity, this warming period will take longer time than for alternative chimneys. Additionally with installation of modern more efficient stoves, flue gas volume and temperature are lower than with older stoves, thus providing less heat to warm up the chimney.
- Appliances that increase flow resistance have been installed in the chimney, as for example retrofit catalysts or flaps.
- Kitchen fans (in combination with new tight buildings) can lead to a significant pressure decrease in the room, thus preventing the formation of sufficient draft in the chimney.
- Stoves with integrated particle filter or catalyst. In such cases, the manufacturer should give instructions how much draft is needed and how critical operating phases as ignition and recharging should be handled.

If one or several risk factors apply the actual draft conditions at place should be evaluated and crosschecked with the stoves minimum draft requirement. Sometimes an alternative chimney construction, either new or retrofit, could already be enough to eliminate the risk factors and increase draft. If these measures are not applicable or not enough, a flue gas fan could be the solution to ensure sufficient combustion conditions. The following points should be considered when selecting and installing a flue gas fan:

- To avoid overpressure in the chimney and flue downstream the stove, it is advantageous to place the fan on the top of the chimney. This location also helps to minimize noise emissions.
- The size of the fan should be sufficient to generate the required draft at all conditions, this means for example even for full load operation at poor weather conditions.
- The flue gas fan should be capable to withstand flue gas exposure in terms of expected gaseous and particle emissions.
- Fan operation should be controlled to keep the draft at recommended levels. This control can be a stand-alone solution or integrated into an automated stove control system.

•



4 WP 4: Testing and evaluation of the technologies developed

All results from the test runs performed with the respective technologies in WP4 are presented in the respective chapters where the technology and achieved concepts itself are presented in full detail (see chapters 1, 2 and 3).

4.1 Common method for testing of the improved stoves or system components under harmonised conditions

For those developments and devices, which require a close to real-life testing procedure for realistic assessment, a common test approach was developed and agreed in the project. A brief summary of this procedure is described in the following.

Measurement section and equipment. The measurement section should be designed according to good laboratory practice, with regard to required inlet/outlet zones and sufficient tightness of the measuring points. The position of flue gas temperature measurement for efficiency determination should follow DIN EN 13240. It can be performed by using thermocouple or suction pyrometer. If a suction pyrometer is used a flue gas velocity in the free cross section (5±1mm) of 20 to 25 m/s shall be reached as defined in DIN EN 13240. No burning scale is required because log fuel shall be weighted individually.

Testing procedure. The testing procedure should reflect the new devices' and technology's "real life" performance. For this reason the method was defined to be largely in accordance with the "beReal method" as developed in the beReal project, when applicable. Further information can be found on http://www.bereal-project.eu/.

Prior to and after all measurements at one stove a leakage test at 5 Pa, 10 Pa, 15 Pa (3 repetitions) should be performed by applying under-pressure from the flue gas socket while the all air supply ducts remain closed (according prEN16510). The actual combustion tests should then be executed using a constant flue gas draught of (12 ± 2) Pa.

The fuel consumption is determined by weighing the wood charged into the stove. The testing fuel used should be beech or birch, without bark, having a triangle shape. The ash content of the test fuel should be <1 % and the moisture content should be at (16 ± 4) % (sampling and determination without delay).

The test runs are executed by performing 8 successive batches (5 full load + 3 partial load) starting from cold conditions (including 1st ignition batch). The Moment of refilling is reached when the CO₂ content of the flue gas is ≤ 4 % and ≤ 25 % of the maximum CO₂ content of the respective batch or if CO₂.max is ≤ 12 % the refilling should occur at 3 % CO₂ when flames are extinguished. Figure 58 shows a flowchart of a whole test run including all refilling criteria. The mode of refilling is defined by the stove manufacturer or RTD partner in a so called "Quick-User Guide".

Poking, raking, and levelling-out of the fire bed can be done before recharging or an optional charcoal burnout. At refilling the door opening should last for 60 seconds at maximum.

The air damper settings shall be defined by the manufacturer (in the "Quick-User Guide"). Two to maximum three different damper settings for heating operation can be defined for:

- Ignition batch + (if necessary) 2nd preheating batch
- Heating operation (max. two damper positions)
- Partial load (one additional damper position, if specified by manufacturer)
- Charcoal burnout

If a stove is automatically controlled there can be a build-up of a charcoal bed over the 5 full load batches. In this case the charcoal burnout can be measured in the transient phase to the partial load or at the end of partial load. The automated process control has to display the beginning and the end of charcoal burnout.

Operation during charcoal burnout:

a) Manual stove operation: No additional charcoal burnout should be performedb) Automatically controlled stoves (either after batch 5 or 8):

After batch 5: End of charcoal burnout is given at recharging signal.

After batch 8: End of charcoal burnout is given at recharging or other adequate signal.

Poking of charcoal shall be made only if the user is called for by the automated control system. Temperature



and flue gas volume measurement (hot-wire anemometer or vane wheel anemometer) continues at -12 Pa draught, residues are sampled for carbon content.

An additional PM sampling is made during charcoal burnout, gaseous components are measured as well. The complete residues shall be removed from the stove and the mass has to be documented.

The cool down phase begins when the refilling criterion is reached or when f the controlling system gives the refilling signal at the end of batch 8. The cool down phase ends when a temperature of 50° C at the flue gas socket is reached. The temperature and volume flow measurement shall be continued after the CO₂ target is met (see testing procedure) or when the air flap closure was performed automatically, if applicable.

The heat losses will be evaluated from the end of batch No 8 till 50°C flue gas temperature is reached.

If the air flaps close completely and if the stove shows good air-tightness, an evaluation of the heat losses of the flue gas during the cool down phase does not seem meaningful.

If a heat storage unit is integrated in the stove, partial load operation is not meaningful when the stove is already in steady state operation after full load operation (5 batches) as the heat storage ratio decreases.



Figure 58: Flow chart of testing procedure for improved wood log stoves

Quick user guide. The appliance is operated according to a Quick-User-Guide (Text & Pictures) shown in an example for Hark 44 GT ECOplus in Figure 59. The information of the Quick-User-Guide is provided by the manufacturer and defines relevant operation characteristics that are specific for the appliance:

- Preparations before heating operation
- Mode of ignition
- Mode of refilling
- Requirements of firewood dimensions, number of pieces per batch, arrangement of wood logs in the combustion chamber, for full load and part load
- Adjustments of damper settings for combustion air supply (during and after heating operation), for full load and part load





Figure 59: Example for a quick user guide for the Hark 44 GT ECOplus

Additional procedure for stoves with combustion air controllers. If the controller is built-in into the flue gas duct the tests shall be executed on a natural draught chimney otherwise the tests will be performed at a constant draught of -12 Pa. If the controller gives a refilling signal, this signal should be considered as refilling criterion, even if it indicates the time of refilling prior to having met the CO_2 criterion.

To evaluate the effects of the controller compared to a common stove, one test (3 repetitions, each consisting of 8 batches) shall to be executed without using the controller (recharging according to CO_2 criterion).

Flue gas sampling

Measured gaseous components (uncertainties and measurement ranges of instruments):

O2	0 vol% to 21 vol%, ± 0.4 vol%				
CO2	0 vol% to 20 vol%, ± 0.4 vol%				
СО	0 ppm to 15.000 ppm, ± 10% (0-500 ppm: ± 10 ppm/ 0-3000 ppm: ± 45 ppm)				
NOx	0 ppm to 500 ppm, ± 5 %				
OGC	0 ppm to 10.000 ppm, \pm 5 % of current measurement range				
Gaseous components are continuously measured during all test batches. The data measuring and logging interval has to be at least \leq 10 seconds.					



Particle sampling. Particle sampling shall be executed during batches 1, 3, 5 and 7 or during all batches, if two independent sampling tracts are available. Particle sampling starts at cold stove before ignition (i.e. when a match ignites the ignition block), resp. before opening the door when recharging.

The recommended filter materials are a cartridge stuffed with quartz wool combined with a plane filter (or compatible). It has to be ensured that an entire batch can be measured without interruption. The filter pre-treatment has to be at 180 °C, according to individual laboratory practise (i.e. \geq 1 h at 180 °C cooling in desiccator for \geq 8 h). The filtration temperature should be kept constant at 180 °C (same temperature as for OGC sampling). The filter post-treatment shall be set at 180 °C, according to individual laboratory practise (i.e. TFZ: \geq 1 h at 180 °C cooling in desiccator for \geq 8 h).

If a diameter of 150 mm is used for the measuring section the nozzle shall be 12 mm diameter. The nozzle orientation shall be upstream. During particle measurement isokinetic or over-isokinetic conditions should be assured at the nozzle.

After the measurement a rinsing of the sampling probe (i.e. the nozzle, elbow and connecting pipe) with acetone has to be performed, as illustrated in Figure 60. The rinsing procedure of the sampling probe shall be repeated 2 to 3 times. Afterwards the acetone shall be evaporated in an appropriate drying oven. The rinsing container should be post-treated like done with the loaded filters (1 h at 180 °C, Cooling down in desiccator ≥ 8 h). The residues through rinsing shall be proportionally distributed to the load as determined on the filters that were used with the respective sampling probe.





Figure 60: Execution of rinsing of PM sampling tract (source: TFZ)

Data evaluation. The emissions will be evaluated based on the flue gas volume, which means in mg/MJ, derived from dividing the overall mg value by the fuel power input related to the NCV of the fuel mass converted during the batch (beech wood without remaining charcoal and fuel ash Table 9). The overall mg value equals the added sum of measured flue gas volume flow (Nm³ d.b.) multiplied with the measured concentration (mg/Nm³ d.b.) at each time interval (e.g. 10 seconds).



Table 9:Example for calculating the converted net calorific value of the converted fuel						
Fuel composition		Beech wood ¹⁾	Beech wood without remaining charcoal ²⁾			
Parameter	Unit					
moisture content	[wt.% w.b.]	15.00	15.80			
carbon	[wt.% d.b.]	49.1	45.6			
hydrogen	[wt.% d.b.]	6.1	6.6			
oxygen	[wt.% d.b.]	44.4	47.7			
ash content ³⁾	[wt.% d.b.]	0.4	0.00			
gross calorific value (GCV)	[wt.% d.b.]	19.3	18.7			
net calorific value (NCV)	[wt.% w.b.]	15.0	14.2			

¹⁾ fuel composition according to wet chemical analyses;

²⁾ fuel composition without remaining charcoal (including fuel ash) at the end of batch; thus this fuel composition is related to the fuel converted during the batch; composition of remaining charcoal (including fuel ash): 92.5 wt.% C, 0.8 wt.% H, 1.5 wt.% O, 5.2 wt.% ash; ³⁾ remaining charcoal includes entire fuel ash; therefore ash content of fuel converted during the batch (beech wood without remaining charcoal) is equal to 0

Calculation of thermal efficiency (for the complete cycle) shall follow prEN 16510 / DIN EN 13240, added by losses during cool down phase (q_{cool}) and a determination of the losses from residues (q_r) instead of accepting the suggested standard devault value of 0.5 %. The efficiency will be evaluated as one time weighted average value including all measurements of all considered batches (for thermal (q_a) and chemical (q_b) flue gas losses). Only for automated stoves the charcoal burnout is calculated as an additional batch (i.e. 9 batches in total).

Thermal flue gas losses are calculated over the complete combustion and cool down phase. If the stove closes the air valves completely (measured volume flow below the detection limit e.g. 0.2 m/s) the losses through the cool down phase are set to zero. Chemical flue gas losses are respected from ignition until 18 % O₂-content or until automatic flap closure after batch 8, respectively. The following calculation are followed:

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_{residue} + q_{cool})$$

$$q_{\text{cool}} = \frac{\left((\sum m_{air}^{*} * \Delta t) * c_{p_{air}} * \Delta T \right)}{m_{fuel} * H_u}$$

 $\Delta T = (T_{flue \ gas} - T_{amb})$

with:

 m_{air} = mean mass flow of air through the chimney [kg/s]; $c_{p, air}$ = effective heat capacity of air [kJ/kg*K]; ΔT = temperature difference between flue gas at the standard measuring point and ambient temperature [K]; m_{fuel} = fired fuel mass[kg]; H_u = lower calorific value of the fuel used [kJ/kg]; Δt = time interval for measurement logging [s].

Losses from unburned residues on the grate are calculated as follows:

 $q_r = \frac{m_{residues} - m_{fuel}*a * H_{u,C}}{m_{fuel}*H_{u,fuel}} * 100\%$

Testing procedure for stoves with integrated catalysts. To give an idea of the long-term performance of high or medium temperature catalyst, a "long-term" operation of the stove (over two weeks) with each catalyst shall to be performed. Within these two weeks four dedicated testing campaigns with emission



measurements are performed. CO and OGC emission reduction are determined. In addition the effects of catalyst cleaning after 2 weeks of operation on the emission reduction and the pressure drop caused by the should be detected.

The measurements should be executed according to the method already described above. The catalyst evaluation should be performed either with split flue gas (parallel catalyst and dummy measurement) as shown in Figure 61 (this is the preferable procedure), or by applying catalyst and dummy in sequential test runs. Therefore one testing day (5 full load + 3 partial load batches) with catalyst followed by one testing day (5 full load + 3 partial load batches) with dummy shall be performed. As dummy a catalyst without catalytic coating and identical flow conditions has to be used.

Flue gas temperature measurement before catalyst inlet and online pressure drop measurements over the catalyst needs to be performed, if possible. The duration from ignition until reaching the catalyst's light-off-temperature (i.e. beginning of significant emission reduction) should be determined.



Figure 61: Example for a test stand with split flue gas section (source: BIOS)

Execution of tests. The stove has to be operated over at least 2 weeks (i.e. 10 working days). Within this operation period four dedicated measurement days are included, they are performed as follows:

With split flue gas section:

- 1st day of operation
- after one week of operation (day 6)
- after two weeks of operation (day 11)
- after manual cleaning of the catalyst after 2 weeks of operation (day 12)

Without split flue gas section in sequential test runs:

- 1st day of operation (day 1 with catalyst + 1 test with dummy)
- after one week of operation (day 6 with catalyst + 1 test with dummy)
- after two weeks of operation (day 11 with catalyst + 1 test with dummy)
- after manual cleaning of the catalyst after 2 weeks operation (day 12 with catalyst + 1 test with dummy)

5 WP 5: Elaboration and dissemination of guidelines for the design of future low emission stoves and for the retrofit of old stoves

In the project three guidelines were commonly developed; they compile the achieved knowledge in a compact and structured way to become easily accessible for engineers and developers: (1) The *"Guidelines for Low Emission and High Efficiency Stove Concepts"* summarizes the outcome of the investigations regarding the improvement of wood stoves with respect to emissions and efficiency. It is



meant to support stove manufacturers concerning the optimisation of their products and the development and design of new products. The recommendations given were worked out based on scientific investigations and comprehensive test runs. The complete document is available for download here (free of costs).

(2) The "Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM)" summarises the outcome of the investigations regarding the development of heat storing stoves using phase Change Materials (PCM) to achieve higher efficiency and heating comfort. It is meant to support stove manufacturers concerning the optimisation of their products and the development and design of new products. Its recommendations had been worked out based on scientific investigations as well as comprehensive test runs. The complete document is available for download here (free of costs).

The "Guidelines for automated control systems for stoves" summarises the outcomes of the investigations regarding the improvement of wood stoves by the application of automated control concepts as a primary measure for emission reduction. It is meant to support stove manufacturers concerning the optimisation of their products and the development and design of new products and its recommendations were elaborated based on scientific investigations as well as on comprehensive test runs. The complete document is available for download here (free of costs).

In order to disseminate the project results to a broad public audience, an international project workshop was organised as final project event. Many stakeholders from the participating countries were invited and moreover. All presentations can be downloaded here (free of costs). The workshop agenda is given in the following:

- Welcome and introduction (Hans Hartmann, TFZ) •
- Quantification of energy losses during wood combustion in stoves (Hans Hartmann, TFZ) •
- Flue gas sensors testing and evaluation (results of RISE and BIOS) (Ingmar Schüßler, RISE) •
- Development of integrated stove control systems based on temperature sensors (results of BIOS • and Rika) (Christoph Mandl, BIOS)
- Retrofit controlling units and modern draught stabilizers for stoves, results of TFZ and K+W (Robert • Mack, TFZ)
- Selection and integration of high temperature catalysts into a stove (Thomas Brunner, BIOS)
- Selection and testing of medium temperature metal based mesh catalysts for stoves (Ingmar • Schüßler, RISE)
- Improved high efficiency low emission stove concept including an PCM heat exchanger, results by • (BIOS and Rika) (Ingwald Obernberger, BIOS)

WP 6: Management and coordination 6

The consortium agreement has been prepared and signed by all partners till 18th of November 2017. Furthermore within the project one kick-off meeting and 5 additional, semi-annual consortium meetings were organized and held, in cooperation with the respective local partners. This ensured an intensive communication and co-operation between the partners and enabled the successful completion of all tasks, work packages and the project as a whole within the given schedule. The meetings were:

- Kick-off meeting 27th to 28th of October 2014 in Straubing (Germany), TFZ
- 2nd consortium meeting 27th to 28th to 21st of April 2015 in Lyngby (Denmark), DTU/HWAM 3rd consortium meeting 18th to 19th of November 2015 in Bad Hall (Austria), RIKA 4th consortium meeting 12th to 13th of Mai 2016 in Borås (Sweden), SP/Contura 5th consortium meeting 21st to 22nd of November 2016 in Graz (Austria), BIOS
- •
- •
- 6th consortium meeting 18th to 19th of Mai 2017 in Maisach (Germany), K+W

Moreover a data cloud for the data exchange between all partners was provided and the distribution of the results and outcomes of the meetings was managed. For the dissemination of results, guidelines and other publications which were produced in the project, a download page was created on the web pages of the coordinator (TFZ). The download of all documents is guaranteed without any expiration of the links.

2. If applicable, problems and changes in objectives (Describe the difficulties and problems that have hindered the achievement of the planned objectives, if any, and any alternative plan or change with respect to the former proposal)



There haven't been any problems and changes in the objectives.

3. Collaboration within the consortium (Describe exchange of personnel, actual share of facilities etc. within the consortium)

No comments (see answers in section "How has the ERA-Net made a difference to your research or business?")

4. Project-derived exploitation, e.g. patents, publications						
<i>4.1 Publications of single partners (without <i>involvement of other partners)</i></i>	See below in list of publications: No. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8,					
4.2 Publications with the involvement of other partners of the consortium	See below in list of publications: No. 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15					
<i>4.3 Patents of single partners (without involvement of other partners)</i>	No patents were created during the project period.					
<i>4.4 Patents with the involvement of other partners of the consortium</i>	No patents were created during the project period.					
4.5 Other exploitation						

Table 10: List of publications and dissemination work

No.	Partner involved	Туре	Person	Year	Event or media / Title
1	TFZ	Conference / workshop presentation	Robert Mack, Dr. Hans Hartmann	2015	IEA workshop: Performance of foam ceramic elements in log wood stoves
2	TFZ	Conference / workshop paper	Robert Mack, Dr. Hans Hartmann	2016	EUBCE: Performance of catalytic and non- catalytic foam ceramic elements in log wood stoves
3	TFZ	Conference / workshop paper	Robert Mack, Dr. Hans Hartmann	2016	EUBCE: Standing losses via chimney when using log wood stoves
4	TFZ	Conference / workshop presentation	Robert Mack, Dr. Hans Hartmann	2016	EUBCE: Performance of catalytic and non- catalytic foam ceramic elements in log wood stoves
5	TFZ	Poster	Robert Mack, Dr. Hans Hartmann	2016	EUBCE: Standing losses via chimney when using log wood stoves
6	TFZ	Conference / workshop presentation	Robert Mack, Dr. Hans Hartmann	2016	Abscheider Fachgespräch: Wirkung eines katalytisch aktiven Schaumkeramikeinbaus im Kaminofen
7	TFZ	Conference / workshop presentation	Robert Mack, Dr. Hans Hartmann	2017	Arbeitskreis Holzfeuerungen: Beurteilung nachrüstbarer Verbrennungsluftregelungen für Kaminöfen


8	TFZ	Conference / workshop presentation	Dr. Hans Hartmann, Robert Mack	2017	ECUBE-final-workshop: Quantification of energy losses during wood combustion in stoves
9	RISE/BIOS	Conference / workshop presentation	Ingmar Schüssler	2017	ECUBE-final-workshop: Flue gas sensors testing and evaluation
10	BIOS/RIKA	Conference / workshop presentation	Dipl. Ing. Dr. Christoph Mandl	2017	ECUBE-final-workshop: Development of integrated stove control systems based on temperature sensors
11	NIBE/RISE	Conference / workshop presentation	Johan Furborg	2017	ECUBE-final-workshop: Development of integrated stove control systems based on temperature and flue gas sensors
12	TFZ/K+W	Conference / workshop presentation	Robert Mack, Dr. Hans Hartmann	2017	ECUBE-final-workshop: Retrofit controlling units and modern draught stabilizers for stoves
13	BIOS/RIKA	Conference / workshop presentation	DiplIng. Dr. Thomas Brunner	2017	ECUBE-final-workshop: Selection and integration of high temperature catalysts into a stove
14	RISE/NIBE	Conference / workshop presentation	Ingmar Schüssler	2017	ECUBE-final-workshop: Selection and testing of medium temperature metal based mesh catalysts for stoves
15	BIOS/RIKA	Conference / workshop presentation	Prof.UnivDoz. DiplIng. Dr. Ingwald Obernberger	2017	ECUBE-final-workshop: Improved high efficiency low emission stove with integrated PCM heat exchanger

5. Other comments (on procedures or incl. feedback to the funding organisations, e.g. regarding the contract negotiation phase etc.)

No comments

6. Publishable executive summary of the project and its progress

Please add 3 high resolution pictures with an explanation when you return the report to matté.brijder@rvo.nl

What are the results and the relevance of the project + impact on day-to-day life? (about 4000 characters or 800 words)

Please include any relevant information about your project partners as well. (Max. 1000 characters or 150 words)

Log wood stoves contribute significantly to renewable heat production in Europe. But new efficiency and emission requirements are challenging. Therefore the project "WoodStoves2020" aimed at investigating and improving complete systems of a wood stove appliances, addressing all major technological aspects, from air supply, stove geometry, heat storage capability, sensors and electronics, up to the chimney and its components (Figure 62). Both, thermal efficiency and flue gas emissions were in the focus.





Figure 62: Overview on all system components regarded or optimized in the project. *PCM*: Phase Change Materials. *CFD* Computational Fluid Dynamics (source: TFZ)

Based on a sensor screening four gas sensor models were selected for experimental evaluation in a more than 500 resp. 250 hour long-term stove test; two different types of lambda probes (switching & broadband), a CO/O_2 probe and an O_2 &CO combination sensor. The affordable lambda probes demonstrated a highly accurate oxygen determination throughout the whole evaluation, eventual impairment by aging or particle deposit has not been observed. The combination sensor, which also showed accurate O_2 determination, as well as the CO/O_2 probe enabled a reliable detection of CO gradients & overall ranges, thus proving their applicability. However current costs for sensor and electronics are seen as still too high for a broader use in the stove sector.

Within the project, various automated control systems were evaluated; both integrated systems and addon solutions (retrofit systems). The integrated systems, temperature and flue gas sensor based control systems, consistently improved stove performance compared to manual operation of the same stove (fixed air flow). An example for that potential is seen in Figure 63, where gaseous emissions were reduced (CO: minus 20 - 32 %; OGC: minus 25 - 45 %) and thermal efficiency improved (by 1 - 2 %points) for the same stove just by operating it with an automated control system (due to lower O₂ levels). Another huge benefit of these systems will be the minimization of user induces errors.



Figure 63: Emission reduction and effiency increase achieved by implementing an automated control system in a newly developed low-emission stove (Source: BIOS)

The evaluation of retrofit control systems showed a significant potential for increasing efficiency (by about 1.5 - 4.6 %-points) and for reducing gaseous emissions (by about 40 - 56 %). However, particle emissions remained largely unchanged or were comparable to good manual stove operation.

A new low-emission stove with integrated PCM (phase change material) heat storage was also developed. Compared to state-of-the-art chimney stoves the new stove technology achieved lower emissions and significantly higher efficiencies (> 90 %). The market introduction of this new technology



is expected for 2018.

Experimental evaluation of different types of catalysts (mesh, honeycomb and foam ceramic filters with catalytic coating) was another focus in the project. It could be shown that selection (type & material) and right placement in the stove are crucial to ensure an effective operation with adequate long-term stability. With a proper choice a significant reduction of gaseous emissions and particles can be achieved. Regarding carbon monoxide, for example, reduction rates of more than 90 % (up to nearly complete elimination) could have been observed for some models. Additionally, catalysts will also act as a safety device for severe combustion phases, since reduction rates for hydrocarbon and particles usually even increase at times with bad combustion & high emissions. A challenge in using catalysts will be the increased flow resistance, which is limiting their applicability. Therefore the aim should be to keep the pressure drop across the catalyst as low as possible and/or to use a flue gas fan to increase draft when needed.

However, tests over a whole heating period would be needed to be able to evaluate the long-term performance of catalysts for wood stoves. The assumption that PM reduction could also be achieved by using uncoated (non-catalytic) foam ceramic elements in stoves - as it was recently advertised by several stove manufacturers - couldn't be proven.

The influence of chimney draught (too low or too high) was also investigated. A draught stabilizer was tested and evaluated. It enabled an increased efficiency by approx. 10 %-points, but at the same time it also raised gaseous emissions (+23 %) and PM emissions (+14 %). Furthermore, recommendations regarding the implementation of flue gas fans to overcome cases of too low chimney draught were developed.

Regarding efficiency improvements, the standing heat losses from stoves through the chimney (i.e. losses after stove operation and cold standing losses) were investigated. For a modern 8 kW log wood stove they can amount to 750 kWh per year, assuming 100 heating cycles annually. The tests showed that these losses can be minimized nearly to zero when using automatically closing and tight air flaps or when automated combustion air control units are applied. But with the current prices of automatically closing air flaps and retrofit controllers the pay-off period is still too high (approx. 14 - 23 years).

Furthermore, a PCM heat exchanger was developed and integrated into a stove. It helps to store a relevant share of heat produced and to release it with delay to the room over a longer period. This improves the living comfort and makes such stoves more attractive for low energy buildings. It was shown that more than 50 % of the heat produced can be stored in the stove and in the PCM material. The heat is then slowly released over night. According to the test runs performed the developed PCM heat exchanger shows a good heat storage capacity and is suitable for the integration in a wood stove (efficiencies > 90 % are possible).

All technologies investigated were comprehensively tested using a particularly developed and harmonized testing method which was closer to a realistic stove operation in practise, compared to today's type testing standards. Thus, all achieved results and performances can be also interpreted as directly achievable in field applications.

As an outcome of the project, three Technical Guidelines which comprise the main outcome of the project for manufacturers and other persons of interest were established. The Guidelines are focusing on optimized stove concepts, automated control systems for stoves, and on heat storage units based on PCM. They can be downloaded <u>here</u>.

How has the ERA-Net made a difference to your research or business? ("Quotation: about 80 à 100 words)

Intensive exchange during frequent (semi-annual) meetings have created an atmosphere of strong interlinking of tasks and has established fruitful contacts which shall be continued after the project, too. The scientific group had the chance to learn about measuring practises of other scientific partners and to receive feedback on their existing practises in own laboratory and test stands. This exchange has also triggered some investments into infrastructure (e.g. at TFZ, BIOS and RISE). Similar conclusions can be drawn for industry partners (e.g. Kutzner+Weber, RIKA and NIBE), who have also made investments into testing infrastructure, based on the experience gained during collaboration with the scientific partners has also created business opportunities and in several cases a marketing strategy for these specific products was decided. The harmonisation of test methods has created the basis for more meaningful real life



performance tests of new appliances, these method shall now be used in future projects and developments.

Within the consortium it was possible to make comprehensive joint development and testing of several different catalysts integrated in different stove designs and in a specific catalyst testing rig. Furthermore different control concepts could be developed and be investigated. This broad approach and the concerted share of burden enabled that a high number of scientific aspects and technical devices could be efficiently considered and general conclusions were made possible.

Anhang B





Authors:

Robert Mack and Hans Hartmann

Technology and Support Centre in the Centre of Excellence for Renewable Resources (TFZ), Straubing, Germany

Christoph Mandl and Ingwald Obernberger BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Austria

Ingmar Schüßler RISE Research Institutes of Sweden AB, Sweden

Johan Furborg NIBE AB, Sweden

Florian Volz Kutzner + Weber GmbH, Germany

> Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "WoodStoves2020" – Development of Next Generation and Clean Wood Stoves

> > July 2017



<u>Disclaimer</u>

The concepts and design guidelines presented are a result of a scientific project. The implementation and utilisation of the research results is the decision of each individual person/company. The authors undertake no liability for the utilisation and implementation of the research work and research results as well as for consequences of the resulting technology development or plant operation.

Contact:

Technology and Support Centre in the Centre of Excellence for Renewable Resources (TFZ) Schulgasse 18, D-94315 Straubing, Germany Email: <u>bkinfo@tfz.bayern.de</u>, Tel.: +49 9421 300-110

Download of Guidelines: http://www.tfz.bayern.de/en/162907/index.php



Preface

ERA-NET Bioenergy is a network of national research and development programmes focusing on bioenergy which includes 14 funding organisations from 10 European countries: Austria, Denmark, Finland, France, Germany, Ireland, The Netherlands, Poland, Sweden and the United Kingdom. Its mission is to enhance the quality and cost-effectiveness of European bioenergy research programmes, through coordination and cooperation between EU Member States. The project *WoodStoves2020* (Development of next generation and clean wood stoves) has been supported in the period between April 2014 and June 2017 by ERA-NET Bioenergy under the 7th Joint Call for Research and Development of the ERA-NET Bioenergy from 2013.

Today small-scale biomass combustion is one of the most relevant bioenergy applications. Driven by EU-wide and national measures to promote the utilisation of biomass for energy production, the European market for biomass based residential heating systems is expected to substantially increase by about 130 % until 2020 (based on 2009). Regarding the installed units stoves show the highest and steadily increasing numbers in Europe. According to market studies performed within the EU FP7 project EU-UltraLowDust (Project No. 268189), in 2020 in Europe a potential for an annual installation of almost 2,200,000 stoves (logwood and pellet stoves) was forecasted.

This additional potential for renewable energy production will of course contribute to a reduction of the EU greenhouse gas emissions. However, it is also well known that among the different residential biomass combustion technologies logwood stoves show the highest CO, OGC and fine particulate matter (PM) emissions.

Against this background, the project *WoodStoves2020* aimed at the development of innovative measures and technologies in order to further reduce emissions from wood stoves, to increase their thermal efficiency and to expand their field of application from solely single room heating to central heating. The latter could especially be of relevance for future applications in low energy buildings.

Accordingly, the detailed objectives of the project had been structured as follows.

Objectives related to emission reduction:

- Development and implementation of automated control systems for stoves as a feature of new stoves but also as retrofit units for existing models. Automated control systems can help to widely eliminate user induced operation errors and therefore have a huge potential for emission reduction.
- Evaluation and test of new high-temperature catalysts specially adapted to wood stoves for efficient CO, OGC and soot emission reduction. Catalysts should be implemented in new stove concepts as a basis for an ultra-low emission operation which could be comparable to the emission level of automated small-scale boilers.
- Evaluation and test of foam ceramic materials for efficient PM emission reduction.
- Evaluation of the implementation of modern chimney draught regulators.

Objectives related to increasing efficiency and new fields of application:

- Development and evaluation of efficient and novel heat storage options for stoves such as the application of PCM (phase change material) with high heat storage potential.
- Investigations regarding efficient heat recovery from stoves (increase of efficiency by the implementation of heat storage units or measures to stabilise the draft or to reduce standing losses).

Objectives related to the implementation and evaluation of the different measures:

- Test of the most promising concepts by performing test runs with prototypes.
- Development of design guidelines for stove manufacturers based on the evaluation of the new technologies tested towards a clean stove technology for 2020.
- Development of guidelines for the implementation and retrofit of selected measures for old stoves.

With the new technologies developed within the project an emission reduction between 50 and 80 % and an increase of the efficiencies in a range above 90 % shall be possible. If in future all newly installed wood stoves in Europe would be equipped with these new technologies, a PM emission reduction of 60 to 90 % could be achieved.

In order to reach these objectives, a consortium of 4 research organisations and 4 industrial partners from 4 European countries collaborated within WoodSoves2020 (see next page).

This document summarises the outcomes of the investigations regarding the improvement of wood stoves regarding emissions and efficiency. It should support stove manufacturers concerning the optimisation of their products and the development and design of new products. The recommendations given were worked out based on scientific investigations and comprehensive test runs.



WoodStoves2020 project partners

Project coordinator:

00	Technology and Support Centre in the Centre of Excellence for Renewable Resources (TFZ)	
TFZQ	Straubing, Germany	

Further RTD partners:

	BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH Graz, Austria
RI. SE	RISE Research Institutes of Sweden Built Environment / Energy and Circular Economy Borås, Sweden

Industrial partners

RIKA Innovative Ofentechnik GmbH Micheldorf, Austria
Kutzner + Weber GmbH Maisach, Germany
Nibe AB, Markaryd, Sweden



Table of contents

1	Introduction and objectives1		
2	D	efinitions and limitations1	
2	.1	Definition of chimney stoves 1	
2	.2	Limitations 2	
3	В	asic definitions and stove functioning 2	
4	G	Seneral requirements for low emission and highly efficient log wood stoves	
4	.1	Requirements for low emissions5	
4	.2	Requirements for high efficiency 6	
5	G	eometric design concept	
6	A	utomatic combustion control12	
7	С	FD-aided design of wood stoves12	
8	U	tilization of integrated catalysts and foam ceramics15	
8	.1	Stove Catalysts15	
8	.2	Utilization of integrated high temperature catalysts17	
8	.3	The Non-catalytic foam ceramic elements in log wood stoves17	
9	A	voidance of standing losses from hot and cold chimney18	
10	S	tove connection to the chimney20	
11	R	ecommendations regarding user documentation21	
12	Acknowledgement23		
13	Related literature		



1 Introduction and objectives

Chimney stoves are one of the most common appliances used for residential heating around Europe. Apart from their use for heating purposes, stoves are also seen as decorative accessories, and therefore a broad range of different designs is available.

But combustion of biomass produces air pollutant emissions such as carbon monoxide (CO), organic gaseous carbon (OGC), oxides of nitrogen (NO_X) and particulate matter. Furthermore, in state-of-the-art stoves no automatic combustion control systems are applied, which means user-induced errors, that negatively influence emissions, are more likely to happen. Therefore, further development and optimisation of stoves by means of primary measures is necessary in order to achieve low emissions, which will meet given and planed stricter emission limits (e.g. Ecodesign directive) without cost intensive secondary measures (e.g. filters) as well as to increase their efficiency.

Within the scope of the ERA-NET BIOENERGY project "WoodStoves2020" primary measures for lowering emissions in wood stoves were evaluated by comparison with results from former projects and literature. In addition, test runs investigating the effect of implementing high- and medium temperature catalysts as well as foam ceramics were performed. Furthermore, new stove design concepts were created, which also covered innovative combustion air control systems. Some stoves investigated were also operated using existing retrofit temperature based devices for combustion air control in order to assess the possible improvements.

These direct research outcomes as well as the existing knowledge background were used as the basis for the recommendations in this guideline.

Target group. This guideline provides information primarily for stove developers and manufacturers to use the presented design concepts for development of low-emission and highly efficient appliances. Furthermore, the report should also be of interest for researchers, policy makers and authorities.

2 Definitions and limitations

2.1 Definition of chimney stoves

The following features apply to a chimney stove (Figure 1).

- It is a free standing room heater, not walled, and usually with a front window.
- Only a relatively small amount of heat storage is possible due to the low mass of the stove, but storage devices could be added to the stove to increase its efficiency.
- Fuel is charged in a single layer onto the bed of embers.
- Therefore: frequent re-charging is required.
- Heat is released by radiation from the window and other surfaces and by convection via air ducts and outlets.



ERA-NET Bioenergy Project WoodStoves2020

Guidelines for Low Emission and High Efficiency Stove Concepts



Figure 1: Examples of chimney stoves (from left to right: Contura, Rika, HWAM A/S). (Source: from each manufacturer)

2.2 Limitations

Much of the technical information in this Guideline also applies to slow heat releasing stoves (e. g. tiled stove inserts, closed fire place inserts), but such stoves are not the main focus in this document. This is due to the high variation of their designs and features which would make it difficult to give generalized recommendations. Consequently, tiled stoves, open fire places, cooking stoves, all stoves with water jackets, pellet stoves and sauna stoves are not covered in this guideline.

Apart from all questions concerning proper stove design and operation, further technical improvements are also possible, e. g. by an automated process control or improvement of the heat exchanger. But such secondary measures are separately presented in other guidelines which were also prepared within this ERA-NET-project (see [1], [2]).

3 Basic definitions and stove functioning

For better understanding the following definitions apply.

- Primary air It provides the oxygen needed to gasify the wood fuel and to burn the remaining char in the ember. Primary air is directed to the space where the solid fuel is pyrolysed (bed of embers).
- Secondary air It is needed to provide oxygen to be mixed with released pyrolysis gases which burn as visible flames.
- Window purge air It flushes the window to keep the glass clean. It also acts as combustion air (partly primary and secondary).



- Main combustion chamber space where the fuel is gasified and where the majority of the combustion take place (digit 5 in Figure 2). The main combustion chamber can be divided into different sections: fuel zone and secondary combustion zone
- Post combustion chamber space provided for combustion gases and particles to burn out sufficiently (digit 7 in Figure 2)
- Secondary combustion combustion of the gasification products and intermediate products
- PM_1 particulate matter below 1 µm (aerodynamic diameter), corresponding definitions for $PM_{2.5}$ and PM_{10}
- TSP total suspended particulates
- OGC organic gaseous carbon

Description of stove functioning

In the following, a typical design and functioning principle of a modern log wood stove is described. This functioning is illustrated by the schematic description of a room heater for firewood ("chimney stove") given in Figure 2.

Modern stoves usually have a central air inlet socket (1). For installations where the combustion air is taken from the heated room itself, this central air inlet socket is not required. But it is recommended to provide the possibility of using a retrofit air flow control flap and it is definitely required, if a full shut-down of the stove after heating shall be performed. The latter is to prevent standing losses from cold and hot chimneys (see Chapter 9). For air tight buildings it is required that a combustion air conduit (pipe) can be connected to the chimney stove via a central air inlet socket (1). Such an air inlet socket can also enable the retrofitting of an electronic combustion air control system via a motor driven flap.

The combustion air flow into the chimney stove (blue arrows Figure 2) is divided into

- a primary air stream (2) which flows through the grate into the combustion chamber and
- a window purge air flow (3) which is conducted to the window top and is then directed through nozzles or slots downwards along the window. It flushes the window to prevent tar, soot or particle depositions. But it also serves as combustion air. One part of it usually reaches the bed of embers and can provide primary air to the wood fuel if either the grate is closed (e. g. by a rotation rosette) or if the grate air damper is locked or if no grate exists at all. Another part of this air stream is directed above the bed of embers into the combustion chamber (5) to provide oxygen for the gas phase combustion (serves as secondary air).
- Some modern stoves are equipped with an additional secondary air inlet at the back of the stove wall (4) (this air flow is sometimes also called "tertiary air"). Such an inlet improves the turbulent mixture of oxygen with the pyrolysis gases released from the solid fuel. The portion of this air stream is usually smaller than the window purge air.



The heat produced in the main-combustion chamber is conserved by a heat resistant mineral insulation layer made of fire clay, chamotte or vermiculite. This ensures high temperatures for complete combustion.

In the post-combustion chamber (7) combustion is completed, therefore high temperatures are still maintained by refractory lining (fire clay, chamotte or vermiculite insulation). Also high turbulence is achieved through the deflection plate or "baffle" (6) which leads the hot gases to the narrow entrance of the post combustion chamber. The gases are here finally burnt out and conducted to the flue gas socket from where they exit to the chimney (8) via a connecting pipe.

In the upper area of the stove the hot flue gases heat cast iron, steel or mineral stove surfaces to relatively high temperatures of up to 200 °C. Even higher temperatures are achieved on the window surface which contributes strongly to the heat release into the room. Another relevant heating effect is generated by convection which is created by air flow from ground level passing upwards along the stove surfaces or through convection canals in the stove.



Figure 2: A schematic description of a typical chimney stove (Source: TFZ [4])



4 General requirements for low emission and highly efficient log wood stoves

4.1 Requirements for low emissions

The particulate emissions can be divided into coarse mode (particles > 1 μ m aerodynamic diameter) and fine mode particles (particles <1 μ m) [20]. Coarse fly ashes consist of unburnt fuel particles (sparks) and ash particles which are entrained from the fuel bed with the flue gas. Coarse particle emissions are affected by the gas velocities in the fuel bed as well as by the gas velocities in the combustion chamber and the subsequent ducts and turning chambers:

- Long ducts with many bends retain more particles.
- High primary air flow releases more coarse particles from the grate.

Fine particulate matter emissions consist of soot, fine fly ash (inorganic compounds) and organic matter. Soot (elemental carbon) is formed in the flame in regions with lack of oxygen or on cold walls. Fine fly ash is formed by vaporization and subsequent nucleation/condensation of inorganic vapours released from the fuel during combustion. Particulate organic matter is a result of incomplete oxidation of combustion gases that condense onto particles or form own particles. TSP includes both fine and coarse particles.

The relevant gaseous pollutants are organic gaseous carbon (OGC), carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO_X). The NO_X emissions from wood log combustion are fuel derived, and therefore the amount of NO_X is determined by the nitrogen content of the fuel. Organic gaseous carbon is released from the fuel during gasification. The amount of OGC in the flue gas is affected by the completeness of combustion. Carbon monoxide is an intermediate product from the oxidation of carbonaceous material. Generally the efficiency of combustion (temperature and mixture with combustion air) affects the amount of CO. During the burn-out phase (i. e. after flame extinction) the formation of CO is more difficult to avoid due to low diffusivity of O_2 into the char and because of relatively low temperatures in the combustion chamber.

Adequate quantities of air should be provided for combustion, especially through the window purge air and the additional secondary air nozzles (if used in the design). It is also important to make sure that the appliance has sufficient chimney draft.

Sufficient temperatures in the combustion chamber are needed to oxidize the gases which are released from the fuel bed. The temperature is affected by the refractory lining in the combustion chamber, the shape and size of the combustion chamber, the material and isolation of the door as well as the size of the window and the radiation coefficients of the glass.

The combustion gases should have sufficient residence time in the combustion chamber. The residence time is affected by the gas volume flow and the distribution of the flue gas over the combustion chamber versus the size of the combustion chamber as well as the location of the additional secondary air nozzles (if used). The nozzles can be located for example in the back or in the side walls as well as at different heights.



Sufficient mixing of air with the combustion gases is crucial in order to achieve complete combustion. Mixing is affected by several factors:

- The distribution of the window purge air in the combustion chamber
- The direction and geometry of the additional secondary air nozzles (if used)
- The velocities of flue gas and combustion air
- The distribution of air to the different air flows such as secondary air and window purge air (air staging)
- The geometry of the main combustion and the post combustion chamber
- The geometry the deflection plate and the use of baffles in the post combustion chamber

Avoid leakage air streams by using appropriate material for the door and ensure that the door seals correctly.

Avoid short-circuiting of flue gas streams within the stove. There should be no gaps between the plate separating the main combustion chamber from the post combustion chamber and the side respectively back walls (see Figure 2), through which unburnt gases from the main combustion chamber could flow to the flue gas outlet without passing through the burnout zones in the main and the post combustion chamber.

4.2 Requirements for high efficiency

Type testing efficiency. According to DIN EN 13240 [9] and the new prEN 16510 [5] (to be published) the efficiency η of wood stoves is calculated from the losses during and after combustion (see equations (1) to (4) and Table 1). For untreated wood logs the losses from unburnt material (q_c) on the grate are set to 0.5 %.

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_c) \tag{1}$$

$$q_{a} = \frac{100 \cdot Q_{a}}{H_{i,f}}, \ Q_{a} = \left(T_{fg} - T_{a}\right) * \left(\frac{C_{p,fg} * (C_{f} - C_{r})}{0.536 * (CO + CO_{2})} + C_{P,fgw} * 1,244 * \left(\frac{9H_{f} + W_{f}}{100}\right)\right)$$
(2)

$$q_b = \frac{100 * Q_b}{H_{i,f}}, \ Q_b = 12644 * CO * \frac{C_f - C_r}{0.536 * (CO + CO_2) * 100}$$
(3)

$$q_c = \frac{100 \cdot Q_c}{H_{i,f}}, \ Q_c = \frac{335 \cdot B \cdot A}{100}$$
(4)

7

Guidelines for Low Emission and High Efficiency Stove Concepts

Table 1: Notations and units used in calculations

Notation	Definition	Unit
В	Combustible constituents in residues referred to mass of residues	% of mass
C _f	Carbon content of test fuel (as fired)	% of mass
со	Carbon monoxide content of the dry flue gases	% of volume
CO ₂	Carbon dioxide content of the dry flue gases	% of volume
C _r	Carbon content of the residue, referred to the quantity of test fuel fired.	% of mass
	(Approximation: $C_r = A \times B / 100$)	
	(NOTE For wood logs where the carbon content in the ash residue is not measured and the heat loss q_r is assumed to be equivalent to 0,5 % points of efficiency then $C_r = 1,4925 \times 10^{-5} \times H_{i,f}$)	
$C_{p,fg}$	Specific heat of dry flue gases in standard conditions, depending on temperature and composition of the gases	kJ / K* m ³
$C_{p,fgw}$	Specific heat of water vapour in flue gases in standard conditions, depending on temperature	kJ / K* m ³
H _f	Hydrogen content of the test fuel (as fired)	% of mass
H _{i,f}	Lower calorific value of the test fuel (as fired)	kJ / kg
η	Efficiency	%
Q _a	Thermal heat losses in the flue gases, referred to the unit of mass of the test fuel	kJ/kg
Q _b	Chemical heat losses in the flue gases, referred to the unit of mass of the test fuel	kJ/kg
Q _c	Heat losses through combustible constituents in the residue referred to the unit of mass of the test fuel (as fired)	kJ/kg
q _a	Proportion of losses through specific heat in the flue gases Q_a , referred to the calorific value in the test fuel (as fired)	%
q₀	Proportion of losses through latent heat in the flue gases $Q_{\rm b}$, referred to the calorific value in the test fuel (as fired)	%
q _c	Proportion of heat losses through combustible constituents in the residues Q_c , referred to the calorific value of the test fuel	%
A	Residue passing through the grate, referred to the mass of the fired test fuel	% of mass
T _{fg}	Flue gas temperature	°C
Ta	Room temperature	°C
W _f	Moisture content of the test fuel (as fired)	% of mass

With regard to improving efficiency, the chemical losses of the flue gas are usually insignificant. A relevant improvement on efficiency can usually be achieved by high CO_2 concentration resp. low lambda values. Furthermore, the efficiency can be considerably improved by reducing the flue gas temperature at the flue gas socket. Figure 3 shows the theoretically possible improvement of the efficiency by increasing the CO_2 concentration in the flue gas and also by lowering the flue gas temperature.



8

Figure 3: Possible efficiency improvement by increasing the CO_2 -concentration in the flue gas at constant flue gas temperatures. Assumptions: CO: 0.15vol-% d.b., Fuel: beech wood, fuel moisture content: 14 wt-% w.b. (calculations according to equations 1 to 4).

To achieve lower flue gas temperatures at the flue gas socket and thus to increase efficiency, the heat exchanger surfaces should be appropriately dimensioned in order to ensure an efficient heat transfer.

System efficiency. <u>The efficiency determination in type testing does not cover some</u> <u>important parameters that impact the total system efficiency.</u> At first, any heat release after the temperature measuring location in the standard measuring is disregarded by definition. On the other hand, the type test also disregards any heat losses after combustion ("standing losses") which occur when the stove or chimney are still warm. These gains and losses can significantly improve or reduce the overall efficiency of a fully integrated system. Therefore:

- The stove manufacturer should provide respective guidance to the installer to ensure that the connection to the chimney is made in an efficient way. For example it is in most cases preferable to use the vertical flue outlet with a sufficiently long elbow pipe for chimney connection instead of applying a short horizontal pipe from the rear flue gas socket, which can be an optional connection for many stoves. The magnitude of the possible efficiency gains by prolongation of the (vertical) connecting pipe is described in Figure 8 (see Chapter 10).
- Such efficiency gains can be counteracted by losses after combustion, caused by the heat flow through the chimney which remains relatively high due to the draught created by the heat stored in stove and chimney. The general order of magnitude and the prevention of such standing losses by technical features of the stove are described in Chapter 9.



• Also the losses from unburned material for modern stoves can be many times higher than the 0.5 % claimed in the standard. This applies particularly to the case when the stove shuts down the air supply automatically after heating operation in order to avoid standing losses. However, there are controversial opinions about whether such (coarse) charcoal residues shall be regarded a loss or shall rather be seen as fuel reserve when restarting the stove for a new heating cycle.

5 Geometric design concept

This chapter presents those aspects that need to be considered in the geometric and material design of the stove.

The stove should at least consist of a main combustion chamber and a post combustion chamber (or space for post combustion that can also be a duct).

Insulating materials should be used in the main and post combustion chamber in order to keep the flue gas temperatures sufficiently high.

- Use appropriate insulation strategies for the side and back walls as well as the ceiling
 of the main combustion chamber, e. g. refractory bricks in combination with a layer of
 heat resistant mineral wool and a small air volume between insulation and the outer
 (steel) stove casing.
- Keep the window at a moderate size (see Figure 3) and use glass qualities for the window with low radiation coefficients. Also, the application of coated glasses and of double or triple glazed windows (with an air gap in between) is an option.

Avoid direct heat transfer through metal sheets or the grate to the surroundings





Figure 4: Example for a moderately sized window (left side) and a very large window surface (right side, not recommended) (Source: TFZ [4])

9



The flue gas temperature in the main and in the post combustion chamber should be high and well distributed among the volume, whereas the fuel bed should be kept at moderate temperatures to prevent excessively high burning rates.

Heat exchange. Downstream of the post combustion chamber the flue gas should have enough time to efficiently cool down. Sufficiently large heat exchanging surfaces are needed to maximize the efficiency of the appliance. Heat exchanging surfaces should be placed after the post combustion chamber. The heat exchange to the room air can be improved by introducing forced ventilation via a fan, if the stove is equipped with adequate air ducts or exchange surfaces. Furthermore, additional heat exchangers can be connected downstream of the stove. The simplest form of such a heat exchanger is the connecting pipe to the chimney. The longer this pipe is the lower the flue gas temperature will be. Significant efficiency gains can thus be achieved (see Figure 8 in Chapter 10).

Appliances with integrated heat storage units may show significantly increased efficiencies and therefore also contribute to a better economy of stove technologies. Moreover, they contribute to a better climate in the rooms as the energy released to the room can be better distributed over a rather long period in comparison to state-of-the-art wood log stoves. Modern heat storage concepts can also apply phase-change-materials (PCM) for delayed and controlled heat provision. Further information about how such integration can be performed, can be found in the "Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM)" [2], which were also elaborated within this EraNet Project "WoodStove2020".

In general, it is recommended that the bottom of the main combustion chamber is equipped with a grate. This is to simplify de-ashing before the next use and to ensure a good distribution of the primary air among the fuel bed. However, it must be guaranteed, that the air flow through the grate can be shut down completely. Grate air flow is usually only suitable during the first ignition phase and during the last batch after flame extinction (charcoal burnout phase in a stove operation), or between flame extinction and recharging, when the stove is using an automated process control.

Combustion chamber geometry. High and slim combustion chamber geometry (Figure 5) is usually preferable compared to a wide and low height (although the smaller base area may then require shorter wood logs). A high and slim shape improves flame dispersion and leads to a more homogeneous residence pattern for the produced pyrolysis gases in the hot zones (i.e. less danger of short circuit flows).



Figure 5: Example of a high and slim (left side) compared to a low and wide (right side, not recommended) combustion chamber geometry (Source: TFZ [4])

Air supply and air staging. Air staging is an efficient way of reducing the emissions in a chimney stove. Air staging means that different air flows are introduced to ensure equally distributed fuel decomposition and charcoal burnout as well as an almost complete gas phase burnout. Chimney stoves without air staging are usually operated with primary air only. Combustion air can be supplied as primary, window purge air and secondary air (for more comprehensive description see Chapter 3).

A minimum requirement for air staging is to add primary air and window purge air. The air streams should be separately controlled. To avoid false operation the manual air control should be achieved by a single handle only. The best way to control it is an automatic air control system (see Chapter 6).

If, besides to the window purge additional air secondary air is injected, it should not directly hit the logs. Usually, all air streams should be separately controllable.

Other points that should be taken into account when designing air staging:

- The air streams that take part in secondary combustion should be pre-heated. This can be arranged without an external heating system by the design of the air ducts. In contrast, the primary air should not be pre-heated (but preferably delivered at ambient temperature) in order to avoid too fast burning rates.
- Due to limited chimney draught the pressure drops of the combustion air supply and flue gas canals have to be considered and to be kept low.
- Special care has to be taken regarding the position of additional secondary air nozzles (if considered). If they are mounted too low, the air stream can hit the wood logs and act as primary air. If they are mounted too high (at the upper end of the rear



wall in the main combustion chamber), their effect will be limited because then the effective residence time after mixing at high temperatures becomes shorter.

It shall also be mentioned, that there is a conflict for those stoves which shall – perhaps additionally – be tested according the Norwegian standard test method NS 3058 – 3059 [6 – 8]. In this case the manufacturer is tempted to mount the rear nozzles higher than for those stoves that shall be tested according to Central European test method EN 13240 [9]. This higher position can be beneficial when performing the obligatory overloading test, but it is disadvantageous when an optimal stove operation is performed, as given in the Central European test method.

6 Automatic combustion control

Reasons and benefits of an automated combustion control are listed as follows.

- Due to an optimised supply of combustion air over the duration of a batch the emissions can be minimized and the efficiency can be significantly increased. In addition to that an automated control system can prevent standing losses of a stove (see Chapter 9). Therefore, it will lead to fuel savings over the heating season.
- Moreover, an automatic control system will minimize the user influence (inaccurate air valve settings), and it can maximize the comfort for the user.
- The automated control system also opens up the possibility to provide feedback to the stove operator (e.g. by error messages on display or by acoustic and visual indications). This can for example be useful when ignition is not performed correctly or when fuel mass charging and fuel moisture content are inappropriate. Such feedback is more and more being regarded necessary to avoid false operation.

For further information about combustion control systems, look at the "Guidelines for automated control systems for stoves" [1], which were also elaborated within this EraNet Project "WoodStove2020".

7 CFD-aided design of wood stoves

BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH has developed a CFD model for the development and optimisation of biomass grate furnaces [13]. This tool consists of an in-house developed empirical fixed bed combustion model, which can also be applied for wood log combustion, as well as CFD models implemented in ANSYS / Fluent, which were especially adapted and validated for turbulent reactive flows in biomass combustion plants.

For wood-log fired stoves, a time-dependent profile of wood log combustion is derived by the transformation of release profile along the grate calculated by the basic packed bed combustion model. Since a transient CFD simulation of the whole batch process is today still too time consuming, steady-state operating conditions have to be defined. In order to reduce a possible falsification of the CFD simulations by the heat storage properties of the stove, an energy balance around the stove as a function of time has to be performed based on test run



data. By this energy balance, two virtual steady-state operating points where the heat storage of the stove is approximately zero can be estimated. The first of these states occurs during the start-up phase and is not used for CFD simulations as the gradients in this phase are rather large. For CFD simulation the second state, which occurs at about 2/3 of the batch length is used.

For the simulation of the gas phase usually the Realizable k- ϵ Model for turbulence, the Discrete Ordinates Model for radiation, as well as the Eddy Dissipation Concept (EDC) in combination with a detailed chemical mechanism for Methane combustion (DRM22 with 22 species and 104 reactions) is applied.

With CFD simulation a number of relevant processes can be analysed: the flow of the combustion air and the flue gas in the stove, the flow of the convective air in the air jacket of the stove, gas phase combustion in the stove as well as heat transfer between gas phase and stove material (insulation, sheets and glass windows). By these simulations, velocities and temperatures of combustion air, convective air and flue gas, path lines of air and flue gas, O_2 and CO concentrations in the flue gas, material and surface temperatures of the stove materials, as well as heat transfer, efficiency and pressure losses can be analysed.

Numerous applications showed, that the CFD-aided development and optimisation of woodlog fired stoves leads to reduced emissions (CO and fine particulates), a better utilisation of the stove volume as well as an enhanced plant efficiency. Furthermore, the CFD simulations result in reduced development times, lower test efforts and an increased security during plant development.

As an example, Figure 6 depicts iso-surfaces of temperatures in a wood log fired stove before and after optimisation. In the basic variant, the flow in the combustion chamber was not favourable concerning the mixing of the flue gas from the wood logs with the window purge air. Furthermore, the volume of the combustion chamber was not fully utilized, which leads to large temperature gradients. As countermeasures the implementation of a wood retainer as well as a re-design of the exit of the combustion chamber were recommended. Based on these recommendations, a first testing plant was realised. Further measures that were implemented covered a better isolation on the back wall of the stove (leading to higher temperatures and therefore improved burnout) and a symmetric design of the air supply (leading to an evenly distributed flow in the combustion chamber, especially around the wood logs, and therefore a stable flame).

Test runs at the modified stove showed that CO and particulate emissions could be significantly reduced (by approximately 49% relating to the first variant investigated). Furthermore, the improved temperature distribution (less gradients) improved the efficiency of the stove (an improvement by 52% of the efficiency related to the heat-exchanger area could be reached).





Figure 6: Iso surfaces of temperatures [°C] in a central vertical section of a stove (Source: BIOS) <u>Modifications:</u> geometry of the exit of the combustion chamber; inclusion of a wood retainer; improved air supply; improved isolation

Recently, CFD simulations have also been used in order to investigate wood stoves with heat storage devices [2, 14]. Thus, it is possible to derive and discuss the thermal behaviour of a heat storage device coupled to a wood log fired stove during the heat-up and discharge phase. Moreover, the influence of the air-flow in the discharging channels and the flue gas flow in the charging channels as well as material properties on the charging/discharging processes can be evaluated. Using CFD wood stoves with integrated heat storage units can be optimised more effectively than by trial-and-error test runs.



In summary, innovative CFD methods constitute a powerful tool for the support of the development of new stove concepts and the evaluation and optimisation of heat storage units. Moreover, it contributes to a better understanding of the underlying processes and thus to a more efficient system optimization. The application of such simulations considerably reduces the effort for test runs and ensures a time-efficient and targeted solution finding.

8 Utilization of integrated catalysts and foam ceramics

When following the guidelines on optimized stove geometry and automated control systems, emissions of unburnt components can nearly be eliminated under a large part of the combustion. But due to the nature of stove operation with its batch wise combustion cycle there will be release of unburnt components at least in the beginning and the end of each batch. Sufficiently high Particle emissions can be reduced when following the guidelines, by reduction of soot particles and organic particles (*hydrocarbons*). But they cannot be completely avoided. Therefore if a further reduction is wanted secondary measures have to be applied, as for example catalysts or particle filters.

8.1 Stove Catalysts

The integration of catalysts into wood stoves can be an efficient secondary measure to reduce stove emissions. The highest catalyst efficiency is usually achieved for the reduction of carbon monoxide. Also the reduction of hydrocarbons and unburnt organic particles is possible, but at lower reduction levels.

The most common catalytic procedure to reduce emissions from the flue gas is the heterogeneous catalysis. At this type the phase of the catalyst (solid) differs from that of the reactants (gas). The basic structure of solid catalysts consists of metals (most common is iron alloy) or ceramics (e.g. aluminium oxide, zirconium oxide). Regarding the structure solid catalysts for emission reduction can be divided into:

- Packed beds
- Monoliths (honeycomb or foam structure)
- Network/wire meshes

A solid catalyst usually consists of:

- Substrate: Carrier material for the washcoat and the active metal. The structure of the catalyst is defined by the material and production process of the substrate.
- Washcoat: To increase the surface of the catalyst a washcoat (powder suspension of metal oxides) is spread and dried on the substrate.
- Active metal: The surface is coated with catalytically active components. These are usually noble metals like Pt, Rh and/or Pd, with following main characteristics:
 - Pd: oxidation of CO
 - Pt: oxidation of VOC and CO
 - Rh: oxidation of NO



• At high operation temperatures also metals like Ni, Cu and Mg can achieve considerable conversion rates.

The first step before implementing a catalyst should always be to optimize combustion through primary measures. Catalysts should mainly have the function to further reduce emissions and to act as safety guards for unexpected situations. This will also contribute to ensure a longer life time with slower degradation.

Secondly, oxidation needs oxygen. An overall and local oxygen deficit has to be avoided by preventing excessive combustion rates when using too much or too dry wood (provide clear user instructions) and by ensuring an adequate flue gas mixture (appropriate design of combustion chamber and air nozzles).

Light-off temperatures for some catalysts can start as low as 200 – 300°C for CO reduction, while reduction of hydrocarbons usually requires higher temperatures. The upper temperature limit is set by the structural and chemical limit of the catalyst's choice of carrier, washcoat & active material and the production process. These catalyst depending temperatures mark the appropriate operation level. Choose a sufficient location for operating the catalyst in that temperature range. The aim is to ensure a fast warm-up and to stay above light-off temperature at all times, but also to avoid exceeding the maximum catalyst temperature limit. Additionally, make the catalyst also easy accessible for the user to enable a removal for cleaning and replacing.

A challenge will be the catalyst flow resistance, which could cause insufficient air flow, thus leading to poor combustion with high emissions. Additionally it increases risks for potential dangerous flue gas backflow into the room, especially during recharging. Observed catalyst pressure drops in the experimental evaluation within the WoodStove2020 project varied from only a few Pascal up to significant double-digit numbers. The aim therefore should be to choose an appropriate catalyst type and size for keeping the flow resistance as low as possible. A large cross section helps, for example, to lower the pressure drop, while keeping conversion rates unchanged. If the flow resistance is still too high and prevent stove operation with natural draft alone, the implantation of a flue gas fan to increase draft when needed can be a solution.

Choose an appropriate catalyst (model and size) with regard to reduction efficiencies. The size will be determined by expected amount of unburnt components and required retention time. Take also into account eventual catalyst degradation over time. The evaluation within the WoodStoves2020 project has shown that by choosing the right catalyst CO reduction rates of more than 90% (up to nearly complete elimination) are achievable. Furthermore reduction of hydrocarbons and particles has been seen in ranges up to 50 % for ordinary conditions and even higher up to 70 - 80% in case of poor combustion.

Another challenge that has been noticed with some catalysts is degradation. For certain models this degradation was quite significant and occurred rather fast during the first weeks of operation. In contrast no respectively only negligible impairment has been observed with other catalysts. An experimental evaluation on the American market, for example, showed no significant differences in catalytic ability between new and used models [18].



And finally, provide clear instructions on how to operate the stove in general and during specific phases. Provide information on recommended cleaning intervals and procedure and on expected life span and replacement options.

8.2 Utilization of integrated high temperature catalysts

The main advantages of a catalyst implementation in the stove compared to an installation at stove outlet are:

- Light-off temperature can be reached in short time
- High operation temperatures of the catalysts may support tar and soot reduction
- At high operation temperatures a better VOC reduction is expected (since the VOCs are long-chain compounds and methane)
- At high operation temperatures the application of non-noble metals is possible whereby production costs can be reduced

The implementation of a high temperature catalyst at the outlet of the post combustion chamber (temperature range of about 500 °C) is not recommended as tests showed unstable reduction efficiencies. The decreasing reduction efficiencies over time can most likely be attributed to catalyst deactivation as a consequence of blocking of active centres caused by aerosol condensation. Therefore, the mounting position of the catalyst has to be carefully evaluated in terms of existing flue gas temperatures in order to minimize risks of aerosol depositions (due to condensation).

High temperature catalysts, which are mounted at the outlet of the main combustion chamber (temperature range 600 - 800 °C) showed sufficiently high emission reduction efficiencies regarding CO (69 - 73 %) and OGC (27 - 38 %) and seem basically to be suitable for logwood stoves. However, the emission reduction efficiency decreased for the catalysts over the testing period of about 100 hours of operation and manual cleaning showed no positive effect (e.g. the CO reduction efficiency decreased from 90 % (first day) to 73 % within the testing period).

In general, tests over a whole heating period would be needed to be able to evaluate the long-term performance of catalysts in wood stoves as well as the possible need of cleaning.

8.3 The Non-catalytic foam ceramic elements in log wood stoves

The investigations regarding foam ceramic elements implemented in stoves without a catalytic-coating have shown no significant effect, neither on particle emissions nor on gaseous emissions, compared to the operation of the same stove using a dummy with comparable flow conditions or a baffle plate [16, 17, 19].



9 Avoidance of standing losses from hot and cold chimney

In stove combustion, flue gas transport is driven by the chimney draught as created during the combustion phase. However, in practice the chimney draught still remains active over a long time after termination of combustion. This is due to the fact that both, stove and chimney still remain warm for several hours. Furthermore, the temperature gradient between the inside of the building and ambient air persists even though both, stove and chimney, may have cooled down completely. As a result, both, room heat and such heat which is still stored in a stove can easily be exhausted through the chimney of a log wood stove; this can account for considerable heat losses which are usually not evaluated in stove tests.

Therefore, modern stoves should provide technical features which ensure a complete shutdown of the air supply to prevent continued flow though the chimney after the stove operation is terminated. Such prevention of cold and warm standing losses can thus be achieved by:

- A simple mechanically or automatically closing air supply flap (for stoves with central air inlet socket)
- Automatically closing air flap as functional part of an electronical combustion air control (for stoves with central air inlet socket)
- Complete closure of all air inlet streams (primary/secondary/window purge air), e.g. provided by an automatic control system as given by an air box (applicable for stoves with or without central air inlet socket)
- For proper functioning of all of the three technical options mentioned above, the stove needs to be highly air-tight. Any false air flow would counteract all efforts towards combustion air shutdown by flaps or dampers.

The use of flue gas dampers which are positioned within the connecting pipe to the chimney is largely less effective concerning heat loss prevention and is therefore not recommended. Due to safety reasons since such devices always need to sustain a minimum flow for complete exhaust removal during final burnout of the last fuel batch. Furthermore, any attempt to start the stove while the flue damper is still completely closed could lead to severe hazards by poisonous gases which could be released to the heated room. Therefore, also the new EN Standard 16510-1 [5] (draft version) claims that such dampers shall not block the flue totally but shall rather incorporate an aperture within the blade, which keeps an area of at least 20 cm² or 3 % of the cross-sectional area of the blade open, whichever is greater.

With automatically closable combustion air inlets, however, modern stoves can reduce the standing losses to a minimum, if the air supply is fully shut down as soon as the stove has cooled down to a given temperature or oxygen level. Furthermore, it should also be clarified whether a complete closure of air inlet flaps is compliant with given legal safety restrictions. Further Information's can be found in the "Guidelines for automated control systems for stoves", which were also elaborated within this EraNet Project "WoodStove2020" [1].

Stove manufacturers should be aware, that the avoidance of standing losses can be a rewarding measure, particularly if high efficiency standards need to be met and be proven. Therefore, these losses were also assessed experimentally during the WoodStove2020-



Project. The outcome of several measurements using 3 different stoves was also published in [3]. A general evaluation of the magnitude of such standing losses in a typical stove application is given in Figure 7(the example reflects the findings for an ordinary 8 kW log wood stove [3]) It shows extrapolation of the standing losses, which are an aggregation of both, cold chimney losses and losses during the cooling-down phase. Assuming a realistic number of 100 heating cycles (i.e. number of operations from cold to cold) per heating period, the overall thermal losses are approximately around 750 kWh, given that the manual dampers of the stove would remain in the last heating position during cooling-down (i.e. with open secondary and window purge air supply). This operational behaviour can be regarded as highly probable, as in practice the stove burnout usually happens overnight. In the unlikely case that those manually operated air dampers would always be closed just after final charcoal burnout, about one third of these losses would still remain due to leakages via not fully closing dampers (e.g. for complete coal burnout) or due to non-air tight stove construction. However, those losses could largely be prevented by a tightly closing automatic flap at the air supply socket or by an automated stove control, provided that the stove is sufficiently air tight.

The heat loss in the example of 100 heating cycles from Figure 7 corresponds to a heating value of approximately 0.5 m³ of staked hard wood logs. By avoiding only the heat losses after stove operation, efficiency gains of 4 %-points could be achieved with the stove that was used for that test runs.



Figure 7: Annual standing losses for different numbers of heating cycles (i.e. number of operation cycles "from cold till cold") and damper positions (source: [3])



10 Stove connection to the chimney

Stove manufacturers usually claim that the efficiency as measured in type testing will in reality be higher if fully integrated stoves are regarded. This is due to the fact, that a type testing procedure requires the flue gas temperature to be measured behind the flue gas socket in a duct with only a short piece of 330 mm non-insulated pipe, followed by 1100 mm insulated pipe (for stoves which are using a pipe with 100 to 180 mm diameter) . Consequently, installations with longer non-insulated connecting pipes would achieve further efficiency gains via additional cooling while these gains are usually not considered in the type test procedure. In practice, the magnitude of such efficiency gains can be quite high, depending on the flue gas temperature at the stove outlet and on the length of the pipe. Figure 8 shows this magnitude as determined from field measurements. For a sound evaluation the flue gas temperature would also have to be considered as an additional important variable, but such comprehensive evaluation is yet not available. However, it can be claimed, that by shortening the connecting pipe (e.g. by choosing the rear flue gas socket for connection to the chimney) system-efficiency losses in the order of 10 to 20 percentage-points may occur (Figure 8).

In type testing manufacturers sometimes try to meet efficiency benchmarks by claiming that a prolonged pipe (i.e. larger than 330 mm) is an essential part of the stove and this pipe is thus directly included in the shipment for the stove purchase. By such declaration the type testing would have to be performed using this longer pipe, which would consequently lead to higher measured efficiency. However, such behaviour not only creates confusion for the end user, it also fuels the ongoing debate about deliberate manipulation of type tests. Such "stove designs" should therefore clearly be avoided.



Figure 8: Field test results for combustion efficiency of log wood stoves as a function of the length of the connecting pipe to the chimney (Results from 8 log wood stoves tested during beReal-project [11], no differentiation for flue gas temperature variation can here be made)



However, there are limitations for such measures, as for certain buildings the chimneyentrance-temperature needs to be kept high enough in order to guarantee sufficient draught and to prevent condensation of the flue gas.

11 Recommendations regarding user documentation

Apart from the chosen fuel and the technological state of the stove, user behaviour was identified as the most influencing parameter regarding efficiency and emissions of log wood stoves [10]. The results of field measurements within the European "beReal-project" [11] had shown that the availability of a Quick User Guide (QUG) can significantly improve stove performance in every day operation. The QUG includes all necessary information for stove operation compiled on only one single page.

It is therefore highly recommended that the manufacturer provides such a Quick User Guide with the stove. For creating the QUG it is required that the manufacturer has thoroughly tested and operated the stove under typical conditions in order to conclude on the best practice which is described in an easily understandable manner for the end user. This shall also help to avoid usual operating errors and failures.

An example of such a Quick User Guide is given in Figure 9). It should provide the following information by text and pictures:

- Fuel mass for ignition (logs and kindling material), for full load, and if applicable for partial load operation
- Mode of ignition (bottom-up or top-down mode, illustrated by photographs)
- Air damper settings for all described operation modes
- Mode and moment of how and when to re-charge
- Termination of heating operation and cleaning requirements of the stove



ERA-NET Bioenergy Project WoodStoves2020

Guidelines for Low Emission and High Efficiency Stove Concepts

1. Preparation & Ignition

- Clean and open the grate and empty the ash box
- Crosswise placement of shavings (3 layers) on top of 3 pieces of Firewood (2 layers) on the grate (central ignition) (Fig. 1 & Fig. 2)
 Length of firewood: 25-33 cm
 Use only dry and natural firewood at least 1 year stored
 - 1. layer 1 firewood piece, 0.5 kg
 - 2. layer 2 firewood pieces, each 0.5 kg
 - 3 layers shavings, crosswise placed total: 0.6 kg
 - Whole mass of the ignition batch has to be 2.1 kg (Fig. 2)
- Air inlet flap settings for ignition:
 - Bypass foam ceramic: fully open "A" (Fig. 3)
 - Primary air supply: fully open "Max" (Fig. 4)
 - Secondary air: fully open "Max"(Fig 5)
- Lighting of starting aid (centrally placed) (Fig. 1)
- Closing of combustion chamber door



2. Recharging

(Starte)	Sec. Sec.
A CONTRACTOR OF TAXABLE	
	ALC: NO
1	
ure 5 Figure	:6
	1 2
7 Figure 8	Figure 9
10	
	re 5 Figure 8

When flames are extinguished <u>and</u> when the firebed is not glowing any more (Fig. 7) Close air inlet flaps (Fig. 8) for avoidance of heat losses Primary air supply: closed "Min" (Fig. 8) Secondary air: closed "Min" (Fig 9)

ATTENTION:

Divergent operation as defined by this Quick-User Guide will lead to non-optimal operation. The requirements regarding emissions and efficiency cannot be achieved.

Figure 9: Example for a Quick User Guide (QUG) for optimal stove operation (Source: The beReal-project [11])



12 Acknowledgement

This project was funded within the ERA-NET Bioenergy programme "Small-scale heat and power production from solid biomass". The project consortium gratefully acknowledges the financial support for carrying out the project provided by:

klima+ energie fonds	Klima- und Energiefonds, Austria
Control of the second s	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Germany
Energimyndigheten	Swedish Energy Agency

13 Related literature

- Mandl, C.; Obernberger, I.; Schüßler, I.; Furborg, J.; Volz, F.; Illerup, J.; Eskerod, B.; Mack, R.; Hartmann, H. (2017): ERA-NET Project WoodStoves2020: Guidelines for automated control systems for stoves, <u>www.tfz.bayern.de/mam/cms08/en/dateien/stoves2020-</u> guidelines automated control systems.pdf
- Mandl, C.; Obernberger, I. (2017): ERA-NET Project WoodStoves2020: Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM), www.tfz.bayern.de/mam/cms08/en/dateien/stoves2020guidelines_Phase_Change_Materials_pcm.pdf
- MACK, R.; HARTMANN, H. (2016): Standing losses via chimney when using log wood stoves. In: ELDRUP, A.; BAXTER, D.; GRASSI, A.; HELM, P. (Hrsg.): Proc. of the 24th European Biomass Conference and Exhibition, June 2016, Amsterdam, The Netherlands, ISBN 978-88-89407-165, pp. 646–650, (paper DOI 10.5071/24thEUBCE2016-2BV.1.11), ETA-Florence Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy
- Hartmann, H.; Schön, C.; Turowski, P. (2015): Richtig Heizen. Der Betrieb von Kaminöfen. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Hrsg.). Mitarbeiter: Obernberger, I.; Biedermann, F.; Brunner, T.; Bäfver, L.; Finnan, J.; Carroll, J. Straubing. TFZ-Wissen - Forschung für die Praxis, Nr. 1, 31 p. Download version: <u>http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/tfz_wissen_b_web_s.pdf</u>
- Draft EN Standard 16510-1 (draft version dated February 2015, yet unpublished): Residential solid fuel burning appliances — Part 1: General requirements and test methods. Paper elaborated within CEN TC 295.


Guidelines for Low Emission and High Efficiency Stove Concepts

- 6. NS 3058-1 (1994): Enclosed wood heaters Smoke emission Part 1: Test facility and heating pattern, Standard Norge
- 7. NS 3058-2 (1994): Enclosed wood heaters Smoke emission Part 2: Determination of particulate emission, Standard Norge
- 8. NS 3059 (1994): Enclosed wood heaters Smoke emission Requirements, Standard Norge
- 9. DIN EN 13240 (2001): Roomheaters fired by solid fuel. Requirements and test methods, Beuth Verlag GmbH, Berlin Germany
- Schön, C.; Hartmann, H. (2012): Log Wood Combustion in Stoves. Influence on Emissions and Efficiency. In: Krautkremer, B., Ossenbrink, H., Baxter, D., Dallemand, J. F., Grassi, A., Helm, P. (Hrsg.): Setting the course for a biobased economy. Proceedings of the International Conference. 20th European Biomass Conference and Exhibition. Milano, Italy, 18-22 June. Florence, Italy: ETA-Florence Renewable Energies, WIP-Renewable Energies, S. 1293–1298, ISBN 978-88-89407-54-7
- 11. EU-Project "beReal": Advanced Testing Methods for Better Real Life Performance of Biomass Room Heating Appliances ("beReal"). 7th Framework Programme managed by REA-Research Executive Agency under grant agreement n° 606605, <u>http://www.bereal-project.eu/</u> Project finalisation in Nov. 2016.
- OBERNBERGER I., BRUNNER, T.; 2015: Guidelines and relevant issues for stove development. Workshop on Highly Efficient and Clean Wood Log Stoves within IEA Bioenergy Conference, October 2015, Berlin, Germany; http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2015_Berlin/index.html
- Scharler R., Benesch C., Neudeck A., Obernberger I., 2009: CFD based design and optimisation of wood log fired stoves. In: Proc. of the 17th European Biomass Conference, June 2009, Hamburg, Germany, ISBN 978-88-89407-57-3, pp. 1361-1367, ETA-Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy
- BENESCH C., BLANK M., SCHARLER R., KOESSL M., OBERNBERGER I., 2013: Transient CFD Simulation of Wood Log Stoves with Heat Storage Devices. In: Proc. of the 21st European Biomass Conference and Exhibition, June 2013, Copenhagen, Denmark, ISBN 978-88-89407-53-0 (ISSN 2282-5819), pp. 578-584, (paper DOI 10.5071/21stEUBCE2013-2CO.7.1), ETA-Florence Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy
- William E. Wilson & Helen H. Suh (1997): Fine Particles and Coarse Particles: Concentration Relationships Relevant to Epidemiologic Studies, Journal of the Air & Waste Management Association, 47:12,pp. 1238-1249, (paper DOI: 10.1080/10473289.1997.10464074), ISSN 1096-2247
- 16. MACK, R.; HARTMANN, H. (2016): Performance of Catalytic and Non-Catalytic Foam Ceramic Elements in Log Wood Stoves. In: ELDRUP, A.; BAXTER, D.; GRASSI, A.; HELM, P. (Hrsg.): Proc. of the 24th European Biomass Conference and Exhibition, June 2016, Amsterdam, The



Guidelines for Low Emission and High Efficiency Stove Concepts

Netherlands, ISBN 978-88-89407-165, pp. 646–650, (paper DOI 10.5071/24thEUBCE2016-2AO.2.3), ETA-Florence Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy

- Wöhler, M.; Jaeger, D.; Pelz, S.; Thorwarth, H. (2017): Potential of Integrated Emissions Reduction Systems in a Firewood Stove under Real Life Operation Conditions, Energy Fuels, (paper DOI 10.1021/acs.energyfuels.7b00803)
- 18. Pitzman, Lyrik; Christensen, Thomas; Clark, Jeremy; Houck, James (2010): The Interim Wood Stove Catalytic Combustor Longevity Study. OMNI Project #: 122-E-08-0
- J. Furborg, B. Nilsson, S. Hajireza, L. Gustavsson, S. Hermansson, H. Persson & I. Schüßler, "Vedkaminen år 2020 - en förstudie av hur användarnas och samhällets krav kan mötas," Energimyndigheten, SP Rapport 2014:31, 2014.
- Brunner T., 2006: Aerosols and coarse fly ashes in fixed-bed biomass combustion Formation, characterisation and emissions, Bool series Thermal Biomass Utilization, Graz, Austria, ISBN 978-3-9501980-4-1

Anhang C





Authors:

Christoph Mandl, Ingwald Obernberger BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Austria

Robert Mack, Hans Hartmann, TFZ - Technology and Support Centre, Germany

Ingmar Schüßler, RISE Research Institutes of Sweden AB, Sweden

Johan Furborg, NIBE Sweden AB, Sweden

Jytte Illerup, Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Denmark

Florian Volz Kutzner + Weber GmbH, Germany

> Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "Woodstoves2020" – Development of Next Generation and Clean Wood Stoves

> > July 2017



The concepts and design guidelines presented are a result of a scientific project. The implementation and utilisation of the research results is the decision of each individual person/company. The authors undertake no liability for the utilisation and implementation of the research work and research results as well as for consequences of the resulting technology development or plant operation.

Contact: **BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH** Hedwig-Katschinka-Straße 4, A-8020 Graz, Austria Email: office@bios-bioenergy.at Tel.: +43 316 481300-27 www.bios-bioenergy.at



Preface

ERA-NET Bioenergy is a network of national research and development programmes focusing on bioenergy which includes 14 funding organisations from 10 European countries: Austria, Denmark, Finland, France, Germany, Ireland, The Netherlands, Poland, Sweden and the United Kingdom. Its mission is to enhance the quality and cost-effectiveness of European bioenergy research programmes, through coordination and cooperation between EU Member States. The project *Woodstoves2020* (Development of next generation and clean wood stoves) has been supported in the period between October 2009 and September 2012 by ERA-NET Bioenergy under 7th Joint Call for Research and Development of the ERA-NET Bioenergy from 2013.

Today small-scale biomass combustion is one of the most relevant bioenergy applications. Driven by EU-wide and national measures to promote the utilisation of biomass for energy production, the European market for biomass based residential heating systems is expected to substantially increase by about 130% until 2020 (based on 2009). Regarding the installed units stoves show the highest and steadily increasing numbers in Europe. According to market studies performed within the EU FP7 project EU-UltraLowDust (Project No. 268189), in 2020 in Europe a potential for an annual installation of almost 2,200,000 stoves (logwood and pellet stoves) is forecasted.

This additional potential for renewable energy production will of course contribute to a reduction of the EU greenhouse gas emissions. However, it is also well known that among the different residential biomass combustion technologies logwood stoves show the highest CO, OGC and fine particulate matter (PM) emissions.

Against this background, the project *Woodstoves2020* aims at the development of innovative measures and technologies in order to further reduce emissions from wood stoves, to increase their thermal efficiency and to expand their field of application from solely single room heating to central heating. The latter could especially be of relevance for future applications in low energy buildings.

Accordingly, the detailed objectives of the project proposed can be structured as follows.

Objectives related to emission reduction

- Development and implementation of automated control systems for stoves as a feature of new stoves but also as retrofit units for existing models. Automated control systems can help to widely eliminate user induced operation errors and therefore have a huge potential for emission reduction.
- Evaluation and test of new high-temperature catalysts specially adapted to wood stoves for efficient CO, OGC and soot emission reduction. Catalysts should be implemented in new stove concepts as a basis for an ultra-low emission operation which could be comparable to the emission level of automated small-scale boilers.
- Evaluation and test of foam ceramic materials for efficient PM emission reduction.
- Evaluation of the implementation of modern chimney draught regulators.

Objectives related to increasing efficiency and new fields of application

• Development and evaluation of efficient and novel heat storage options for stoves such as the application of PCM (phase change material) with high heat storage potential.



• Investigations regarding efficient heat recovery from stoves (increase of efficiency by the implementation of heat storage units or measures to stabilise the draft or to reduce standing losses).

Objectives related to the implementation and evaluation of the different measures

- Test of the most promising concepts by performing test runs with prototypes.
- Development of design guidelines for stove manufacturers based on the evaluation of the new technologies tested towards a clean stove technology 2020.
- Development of guidelines for the implementation and retrofit of selected measures for old stoves.

With the new technologies developed within the project an emission reduction between 50 and 80% and an increase of the efficiencies in a range above 90% shall be possible. If in future all newly installed wood stoves in Europe would be equipped with these new technologies, a PM emission reduction of 60 - 90% could be achieved.

In order to reach these objectives, a consortium of 4 research organisations and 4 industrial partners from 4 European countries collaborated within Woodstoves2020 (see next page).

This document summarises the outcomes of the investigations regarding the improvement of wood stoves by the application of automated control concepts as a primary measure for emission reduction. It should support stove manufacturers concerning the optimisation of their products and the development and design of new products with its recommendations which have been worked out based on scientific investigations as well as comprehensive test runs.



Woodstoves2020 project partners

Project coordinator

Technologie- und	Technology and Support Centre in the Centre of Excellence for Renewable Resources (TFZ) Straubing, Germany

Project partners (R&D)

	BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH Graz, Austria
RI. SE	RISE Research Institutes of Sweden AB Borås, Sweden
DTU	Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Lyngby, Denmark

Industrial partners

RIKA	RIKA Innovative Ofentechnik GmbH Micheldorf, Austria
KUTZNER + WEBER	Kutzner + Weber GmbH Maisach, Germany
NIBE	Nibe AB, Markaryd, Sweden
HUJAM intelligent heat	HWAM A/S, Hørning, Denmark



Table of contents

1		Introduction and objectives	. 1
	1.1	Target group	. 1
2		Definitions and limitations	. 1
	2.1	Definition of chimney stoves	. 1
	2.2	2 Limitations	. 2
3		Basics/fundamentals of automated control systems for stoves	. 2
	3.1	Advantages and potentials of integrated automated control systems	. 3
	3.2	2 Advantages and potentials of retrofit control systems	. 3
	3.3	Challenges and requirements of automated control systems	. 4
	3.4	State-of-the-art of automated control systems	. 5
	3.5	Sensors for automated control systems	. 6
4		Proposed automated control systems for stoves	. 8
	4.1	Design and function of a modern chimney stove	. 8
	4.2	2 Overview of proposed automated control systems	. 9
		4.2.1 Automatically controlled stoves	. 9
		4.2.2 Stove add-ons and retrofit systems for semi-automatic stove control	. 9
	4.3	B Electronic sensor driven automatic control concepts	. 9
		4.3.1 Stove control based on temperature measurement	10
		4.3.2 Stove control based on a combination of temperature measurement and flue gas sensors	12
	4.4	Stove add-ons and retrofit systems, which feature an automatic control	13
		4.4.1 Control strategy	14
		4.4.2 Implementation / technical solution	14
5		Troubleshooting	15
6		Safety requirements and legal frameworks	16
7		Acknowledgement	17
8		Related literature	17
9		Useful sources for further information	18



1 Introduction and objectives

All over Europe there is a growing awareness that residential wood fuel appliances are potentially responsible for a great deal of environmental hazards. The complaints are manifold: particle emissions are dangerous to health, bad smell is annoying, wood is used inefficiently, sometimes illegal fuel (waste) is burnt, regional particle emission limits are violated, etc. Consequently, regulations and restrictions for wood combustion are now being revised in many European countries.

At the same time the performance of stoves and knowledge about proper stove operation are progressing and there are various technical measures which can be undertaken to avoid the problems described above. The end user can today choose between much better stove products than in the past. But above all it is the end user's heating behaviour (i.e. fuel selection, stove operation and maintenance) which is most decisive for achieving high efficiency and low emissions.

Advanced automated control systems provide the basis for a low emission stove operation at increased efficiency since they contribute to a minimisation of user induced operation errors. Therefore, the introduction of such systems, which are presently not widely-used, can have a huge impact on emission reduction from stoves. Moreover, retrofit control units for existing stoves open a wide field of application with an even larger potential for emission reduction.

Therefore, this guideline is intended to improve the combustion performance of chimney stoves which represent todays largest group of appliances. The guideline aims at supporting manufacturers in the development and optimisation of their stoves by means of automated control systems.

1.1 Target group

This guideline is intended primarily for developers and manufacturers of chimney stoves to use the presented control systems for the design and optimisation of automatically controlled low-emission appliances. But it is also meant for professional users such as associations or public bodies. They are invited to make the guideline available either as a complete paper or by using fragments in their own brochures or product-specific manuals. Therefore, all text, photos and images are cleared for publication by third parties without extra inquiry. We only request that a reference to this guideline is made.

2 Definitions and limitations

2.1 Definition of chimney stoves

The following features apply to a chimney stove (Figure 1).

- It is a free standing room heater, not walled, and usually with a front window.
- Only a relatively small amount of heat storage is possible due to the low mass of the stove, but storage devices could be added to the stove to increase its efficiency.
- Fuel is charged in a single layer onto the bed of embers.
- Therefore: frequent re-charging is required.



 Heat is released by radiation from the window or from other surfaces and by convection via air ducts and outlets.





2.2 Limitations

Much of the technical information in this Guideline also applies to slow heat releasing stoves (e. g. tiled stove inserts, closed fire place inserts), but such stoves are not the main focus in this document. This is due to the high variation of their designs and features which would make it difficult to give generalized recommendations. Consequently, tiled stoves, open fire places, cooking stoves, all stoves with water jackets, pellet stoves and sauna stoves are not covered in this guideline.

Apart from all practical questions concerning the proper selection and operation of stoves, further technical improvements are also possible, e. g. by a better stove design or by special flue gas treatment. But such primary and secondary measures are separately presented in other guidelines which have also been prepared during this ERA-NET-project (see [1] and [2]).

3 Basics/fundamentals of automated control systems for stoves

Advanced automated control systems provide a basis for a low emission stove operation at increased efficiency since they also contribute to a minimisation of user induced operation errors. Therefore, the optimisation and introduction of such systems, which are presently not widely-used, can have a huge impact on emission reduction from stoves. They shall provide a basis for achieving low emissions during operation not only at test stand conditions but also in real life operation. Moreover, retrofit control units for existing stoves open a wide field of application with an even larger potential for emission reduction. An automated control system for a stove can control and optimise the operation of the stove but cannot influence the fuel used. Therefore, it is very important that an appropriate fuel quality needed for an efficient and clean operation of the stove is ensured by the user. Appropriate guidelines regarding suitable fuel qualities as well as ignition manuals are available (see [3]).



3.1 Advantages and potentials of integrated automated control systems

The implementation of automated control systems shows the following advantages and potentials:

- reduce user influences (operating errors)
- provide the possibility to react on the changing process conditions throughout the entire batch
- reduce emissions (see Figure 2) and increase the thermal efficiency
- operation comfort
- reduce standing losses (by closing air flaps)



Figure 2: Schemes of a combustion batch for a conventional uncontrolled stove (left side) and an automatically controlled stove (right side)

The differences between the graphs shown in Figure 2 illustrate the advantages of an automatically controlled stove. The combustion chamber temperature (T) is more stable and is kept on a higher level. The O_2 level is more even and shows lower values during the main combustion phase as well as during the burnout phase resulting in higher combustion chamber temperatures and therefore in lower CO emissions with only one peak during the ignition phase of the batch.

3.2 Advantages and potentials of retrofit control systems

The implementation of retrofit control systems shows the following advantages and potential:

- reduce user influences (operating errors)
- provide the possibility to react on varying process conditions throughout the entire batch
- reduce emissions (only gaseous) and increase the thermal efficiency
- increase of operational comfort
- reduce standing losses (by closing air flaps)



Figure 3: Efficiency and heat losses in manual operation with air flaps remaining in last position (left). Efficiency and heat losses with retrofit controller installed at the air socket (right). Efficiency=100%-losses; q_a=thermal losses; q_b=chemical losses of the flue gas; q_cool=standing losses while cool down; q_residue=energy content of the residues.

The pie charts shown in Figure 3 shall give an idea of the differences in efficiency and losses by manual operation, when the air flaps are not adjusted after heating operation compared to the operation using a retrofit controller installed at the air socket of the stove. When comparing the two pie charts it becomes obvious that efficiency can be improved by up to 5.7 percentage points. This is due to the prevention of heating losses during the cool down phase by 3.1 % and higher CO_2 resp. lower O_2 levels during combustion (see Figure 2) which leads to reduced thermal losses (q_a).

Furthermore, the combustion tests during the project suggest that CO emissions can be reduced by up to 55 % and OGC emissions by up to 37 %, but the particle emissions remain in the same range if the controller is well adjusted to the stove. However, if the controller is not specifically adjusted to the particular stove model or no adjustment is possible, the particle emissions from stoves with retrofit controllers can be higher than by manual operation.

Therefore, it is highly recommended that a retrofit control unit is either sold and installed by the stove manufacturers themselves, or by qualified personal, able to adjust the controller settings to the particular stove model and to installation conditions on site (draught, external air supply etc.). Another prerequisite for retrofitting a stove with a combustion air controller is an external air supply socket which has to be air-tight to ensure low leakage air.

3.3 Challenges and requirements of automated control systems

Besides the advantages and potentials shown also challenges and requirements are given which have to be considered.

- robust sensors are needed
- the technical solution has to be economically competitive
- a 230 V electrical connection is required
- the automated control concept needs to be suitable for different fuel qualities and loads



• The control concept/unit needs to be safe and fulfil the national safety regulations if the air supply shall be closed completely.

3.4 State-of-the-art of automated control systems

Common logwood stove concepts are usually manually controlled (by a control switch). Therefore, process control efforts are usually limited to a change of the combustion air distribution at the end of the ignition phase. Recent technical solutions towards stove automation can be divided into automatically controlled stoves and stove add-ons, which feature an automatic control.

- Automatically controlled stoves
 - Thermo-mechanically operated air flaps (HWAM automatic[™], Wodtke Air control)
 - Electronic sensor driven automatic control concepts (RIKATRONIC[™], HWAM Autopilot IHS[™], Hark 44 GT ECOplus SC)
- Stove add-ons and retrofit systems, which feature an automatic control
 - Chimney draught stabiliser and flue gas fans (K+W draught stabilizer, ATEC Florian)
 - Air and flue gas flaps (K+W Compact, Schmid SMR, TATAREK RT8OS-G-TD, Brunner EOS, OCOntrol) – see Figure 4



• Electronic air distribution systems (ATEC Airmaster)

Figure 4: Picture of the retrofit automated control system LKF of K+W based on a temperature controlled air flap (Source: K+W)



3.5 Sensors for automated control systems

For implementing a reliable automated control system based on electronic sensors the choice of sensors is crucial. In the selection process certain specific criteria should be considered, such as price, availability, life span, temperature resistance, signal selectivity, stability & processing.

The most important criterion of course is ensuring an acceptable price level for sensor & peripherals, since the costs for implementing sensors will result in a higher relative market price increase than compared to conventional stoves.

Regarding availability it is essential that the sensor's development status is commercially ready. The sensor should be available in sufficient numbers and consistent quality since it is intended to implement it in a commercial product.

Similar requirements are also valid for the life span expectation – ideally it should be unnecessary to replace the sensor during the stove's normal life time.

The criterion resistance ability to temperature and other ambient conditions has impact on the sensor location possibilities. The sensors must be able to be placed in representative locations to give a fast and suitable signal for the control system to act on. For example, the positioning of a temperature sensor in the flue gas socket provides a less sensitive and less dynamic control signal compared to a sensor located in a suitable location in the combustion chamber, thus would weaken the control system's potential.

The signal selectivity, stability & processing influences the control systems overall operation properties and the effort in implementing the system. Ideally the signal of the sensor can be directly processed, which helps to minimize control peripherals. Furthermore, it should accurately and stable reflect the desired parameter to be measured with minimal cross sensitises to other ambient conditions.

Depending on the kind of automatic control system different sensors can be used, as for example:

- Temperature sensors
 - Thermocouples are the cheapest sensors available and also rather robust, therefore they are an excellent choice for stove control
- Gas sensors
 - In terms of aiming for high efficiency and low emissions the most useful sensors would be oxygen or carbon dioxide sensors as well as sensors for unburnt components such as carbon monoxide and hydrocarbons.
 - Online oxygen sensors are commonly used in combustion appliances, especially in form of lambda probes respectively similar sensors based on the same measurement principle (example for manufacturers: NGK Spark Plug Co., LAMTEC, J. Dittrich Elektronic). According to literature they have been proven to be reliable and durable for use in biomass combustion appliances with general good accuracy and little cross sensitivity. Long-time evaluations (several hundred hours) within the Woodstoves2020 project with two different lambda probe models (switching & broadband type) confirmed that statement.



Both types delivered a fast and reliable signal with no observed long term effect on stability and accuracy and have therefore been found to be suitable for usage in automated stove control systems.

- Sensors for carbon monoxide usually detect all unburned components, therefore provide a combination signal for CO and Hydrocarbons (example for manufacturers: LAMTEC, FIGARO Engineering inc). According to literature, development has significantly improved within the last years in terms of availability, accuracy and stability. Their utilization in control concept has been successfully proven in some projects, at least with providing usable and reliable trends. On the downside, they are still more expensive than for example oxygen sensors.
- Combination sensors for oxygen and unburnt components provide a compact 0 opportunity for generating a high-end control concept aiming for best efficiency with lowest emissions (example for manufacturers: LAMTEC, Sensic). Regarding their current development status the same conclusion is valid as for CO sensors. They are still quite expensive, but their performance has been improved during the last years. Specific test runs (up 250 hours) with the combination probe KS1D of LAMTEC at a low-emission logwood chimney stove within the Woodstoves2020 project have been performed. Generally, the combination probe KS1D seems to be suitable for the implementation into an automated stove control concept based on the results achieved so far. The sensor can well reproduce the O₂ trend over the entire range of operation of a wood stove. Regarding CO some deviations, especially at higher CO levels (> 1,000 ppmv), occur. If the internal compensation function of the sensor would be determined for biomass combustion systems at different CO and O₂ levels then the deviation could most probably be reduced (according to the manufacturer). However, the CO trend is sufficiently well predicted. Due to the recent high costs the combination probe KS1D is currently not recommended for the integration in the automatic control system of stoves.
- Pressure sensors
- Other sensors, as for example detectors for recognizing flame or door opening

Before using a sensor in a commercial product, its suitability to be used in such an appliances should be reviewed through market & literature study or if necessary through own evaluation. See chapter 9 for information regarding manufacturers of sensors.



4 Proposed automated control systems for stoves

4.1 Design and function of a modern chimney stove

In the following, a typical design and functioning principle of a modern chimney stove is described. For better understanding the following definitions apply:

- Primary air: It provides the oxygen needed to gasify the wood fuel and to burn the remaining char. Primary air is directed to the space where the solid fuel is pyrolysed (bed of embers).
- Secondary air: It is needed to provide oxygen to be mixed with released pyrolysis gases which burn as visible flames. It is usually applied as window purge air but it can also be supplied as a combination of window purge air and additional secondary air supplied through additional nozzles.

Figure 5 shows the flow of air and flue gas in a chimney stove. For air tight buildings it is required that a combustion air conduit (pipe) can be connected to the chimney stove via a central air inlet socket (1). Such an air inlet socket can also enable the retrofitting of an electronic combustion air control system via a motor driven flap.



Figure 5: Typical design of a chimney stove (here: stove with central air supply socket and primary air via grate)

The combustion air flow into the chimney stove (blue area in Figure 5) is divided into

- a primary air stream (2) which passes through the grate into the firebox and
- a window purge air flow (3) which is conducted to the window top and is then directed through nozzles or slots downwards along the window. It flushes the window to prevent tar, soot or particle depositions. But it also serves as combustion air. One part of it usually reaches the bed of embers and can provide primary air to the wood fuel if either the grate is closed (e. g. by a rotation rosette) or if the grate air damper is



locked or if no grate exists at all. Another part of this air stream is directed above the bed of embers into the combustion chamber (5) to provide oxygen for the gas phase combustion (serves as secondary air).

• Some stoves are equipped with an additional secondary air inlet at the back of the stove wall (4) (this air flow is sometimes also called "tertiary air"). Such an inlet may improve the turbulent mixture of oxygen with the pyrolysis gas released from the solid fuel. The portion of this air stream is usually smaller than the window purge air.

The heat produced in the firebox (i. e. combustion chamber) is conserved by a heat resistant mineral insulation layer made of fire clay or chamotte. This ensures high temperatures for complete combustion reactions. In the post combustion chamber (7) combustion is completed, therefore high temperatures are here still maintained by refractory lining (fire clay, chamotte or vermiculite insulation). Also high turbulence is achieved here through the deflection plate (6) which leads the hot gases to the narrow entrance of the post combustion chamber. The gases are finally burnt out here and are conducted to the flue gas socket from where they exit to the chimney (8) via a connecting pipe.

4.2 Overview of proposed automated control systems

Several different systems of automated controls for logwood stoves have been evaluated within the ERANET project Woodstoves2020. However, other systems will be considered within this guideline as well. In the following some examples for integrated, add-ons and retrofit systems are presented.

4.2.1 Automatically controlled stoves

- Electronic sensor driven automatic control concepts based on
 - Flue gas temperature measurement in the combustion chamber
 - Oxygen measurement in the exhaust gas
 - o Combinations of temperature measurement and oxygen measurement

4.2.2 Stove add-ons and retrofit systems for semi-automatic stove control

- Chimney draught stabiliser
- Automatic combustion air valve based on
 - o Flue gas temperature measurement in the combustion chamber
 - Oxygen measurement in the exhaust gas
 - o Combinations of temperature measurement and oxygen measurement

4.3 Electronic sensor driven automatic control concepts

Electronic sensor driven automatic control systems are more efficient but also more costly. The temperature (for example in the post combustion chamber) or the oxygen concentration of the flue gas, as well as a combination of these, can be applied as guiding parameters for automated adjustments of the combustion air flow and combustion air distribution by flaps over time.



4.3.1 Stove control based on temperature measurement

This automated control system is based on a temperature measurement in the combustion chamber and flaps for the combustion air supply control. The different combustion phases can be identified by temperature changes and since temperature sensors are the cheapest sensors available and also rather robust, they offer a suitable opportunity for stove control.

The basic control strategy can be described as follows:

- Ignition phase
 - Mainly primary air and a low amount of window purge air is supplied in order to facilitate a quick ignition and rapid increase of the combustion chamber temperatures
- Transition to main combustion phase
 - As soon as the temperature in the combustion chamber exceeds a certain level the primary air damper is closed to avoid excessive burning rates
 - At the same time secondary air and window purge air flows are increased to maintain adequate combustion air supply
 - During the main combustion phase the secondary and window purge air flow should be kept rather constant. The distribution between these two flows depends on the furnace design (combustion chamber and air injection nozzle geometries) and should be experimentally optimised for a specific stove type.
- Transition to charcoal burnout and charcoal burnout phase
 - when the furnace temperature starts to drop below a certain value, the amount of secondary and window purge air should be reduced to keep the temperature at a reasonably high and nearly constant value until the end of the batch
 - Thereby, excess oxygen is kept low and too much cooling of the combustion chamber is prevented.
 - As soon as the flames extinguish the CO and OGC emissions strongly increase. Thus, re-charging of fuel should be performed as soon as the flames extinguish.

Following this approach

- a shorter ignition phase can be achieved
- with combustion air flow control during the main combustion and burnout phase more stable O₂ concentrations in the flue gas can be achieved
- generally lower O₂ levels as well as sufficiently high temperatures (relevant for improved burnout) can be achieved

resulting in lower emissions and higher efficiencies.

Basically, the combustion air flows (primary, secondary and window purge air) are controlled in dependence of the furnace temperature (measured by a flame temperature sensor) and a calculated time dependent temperature gradient (see Figure 6).



Figure 6: Trends of the combustion chamber temperature and damper positions of a test run with a logwood fired stove with automated control system based on temperature measurement (dashed lines mark the beginning and the end of a batch)

At the stove the primary air through the grate as well as window purge air and secondary air (if applied) are supplied. The combustion air flows have to be separately controlled by electronically driven dampers and the furnace temperature is measured by a flame temperature sensor located in the main combustion chamber (see Figure 7).



Figure 7: Scheme of a logwood fired stove with automated control system (source: RIKA)



4.3.2 Stove control based on a combination of temperature measurement and flue gas sensors

These automated control systems identify different combustion phases with the help of gas sensors and adjust the air dampers accordingly. The combination with additional sensors, such as temperature and pressure sensors is also possible and provides further information for the control system. Such control systems are more complex and expensive than systems based on temperature sensors alone but also create opportunities to further improve efficiency and flue gas emissions as well as deal with unexpected events.

An automated control system based on an oxygen & temperature sensor (assisted by a sensor that recognizes door opening) would identify ignition & refueling, main combustion phase and charcoal burnout and adjust the damper settings for primary, secondary and tertiary combustion air accordingly. The basic control strategy for these main operating phases is as follows:

- Ignition phase
 - The aim is to ignite the wood and increase the temperature in the combustion chamber as quickly as possible to avoid unnecessary release of unburnt components. In order to achieve that a high air flow is needed and therefore air dampers are opened when the ignition signal is triggered.
 - During ignition the oxygen content in the flue gas is reduced while temperature increases. When both signals reach a certain lower respectively upper value the primary air damper is closed. This marks the transition to the next operation phase.
- Main combustion phase
 - With the primary air damper closed the fuel gasification rate is slowed down in order to avoid insufficient oxygen supply in the gas combustion zone.
 - In the following the automated control adjusts secondary and tertiary air to keep the temperature and the oxygen in the flue gas within defined ranges. Secondary air damper setting is thereby based on temperature and tertiary dampers on oxygen content. In order to achieve a smooth combustion, rapid and too large changes in damper settings should be avoided.
 - In the end of the main combustion phase when less volatile matter will be released from the fuel and mainly charcoal remains, the oxygen signal will increase above the defined range despite having the corresponded air damper adjusted to its minimum position. This marks the end of this main combustion phase and the transition to the next operation phase.
- Charcoal burnout towards refueling or final burnout
 - The control during this phase is based on oxygen signal and adjusts primary and secondary air dampers accordingly to keep the oxygen level within a defined range. Enabling primary air accelerates charcoal burnout in the bed of embers and generates heat to avoid a rapid drop in combustion chamber temperature.



- When the oxygen content rises above the desired range despite dampers at their final positions, the stove will signal for the next batch
- If the user follows this refueling signal the stove will switch back to ignition phase with air dampers open for rapid ignition until defined oxygen & temperature levels are reached, marking again the begin of the main combustion phase
- If the user refuses to refuel, the stove switches to final burnout with fully open primary air, at which end, when reaching the final levels for oxygen and temperature, the dampers are closed to minimize standing losses

The different control parameters such as oxygen & temperature ranges, damper positions as well as primary/secondary/tertiary air ratio and amount should be experimentally optimized for the specific combustion chamber.

This control concept aims for achieving short ignition and charcoal burnout phases in order to minimize emissions of unburnt components while optimizing efficiency by avoiding unnecessary excess air. The control system shall ensure constant and optimal temperatures and oxygen concentrations throughout a whole combustion cycle (see Figure 8) which makes it very robust to different ways of operation.



Figure 8: Trends of the combustion chamber outlet temperature and O_2 concentrations of a batch with a logwood fired stove with automated control system based on temperature and oxygen measurements (Source: DTU)

For situations where a flue gas fan is necessary (e.g. insufficient draft due to installation limitations, weather conditions, secondary measures such as filters or catalysts) the implementation into the automated control concept is possible either for continuously draft depended operation (based on for example a pressure sensor) or intermittent operation for certain operation phases (as for example cold ignition or refueling).

4.4 Stove add-ons and retrofit systems, which feature an automatic control

Also for retrofit control systems it would be preferable to control primary and secondary air in the way described in chapter 4.3. In practise it is only possible to adapt the controller as an air flap on a central air inlet socket. Furthermore, it is required that the stove is air-tight when



oxygen supply via the air flap is shut down. Sensors for retrofit control systems can only be located behind the stove in the flue gas pipe, this is because manipulation of the stove itself is not allowed without approval by the manufacturer.

4.4.1 **Control strategy**

For universal retrofit systems certain specific parameters, like flue gas temperatures or O_2 levels, are not given, only a conservative air control is possible as shown in Figure 9.



Figure 9: Function of air supply compared to temperature trends of two different stove types (Source: K+W)

The first part (heating period) of the batch is characterized by a high combustion air demand. To supply enough air for all cases the air flap is totally open so that the stove works comparable to a manually operated system. In the subsequent output period which can be identified by a certain temperature-criterion, air supply can be stepwise reduced in order to keep the combustion temperature on a higher level. After the charcoal burnout phase (glow period) the standing losses can be reduced by closing the air supply completely. Apart from the prevention of failures in user operation such loss reduction represents one of the main benefits of a retrofit air control device.

4.4.2 Implementation / technical solution

A typical retrofit controller is shown in Figure 10. It consists of a control unit, an electrically driven air flap and a sensor for flue gas temperature. To guarantee a proper stove operation in combination with the controlling unit the following points should be considered.

- The temperature sensor shall be installed as close as possible to the flue gas socket • (centrally placed) in order to avoid any additional delay due to given thermal inertia and to ensure a quick reaction of the controller to the current stove behaviour.
- The installation of the air flap at the air inlet socket of the stove shall be performed • with absolute air tightness. In the same way high air tightness is required for the stove

14



itself. Both requirements aim at avoiding leakage air passing around the air flap to the stove.

The findings in this ERANET-project had shown that there can be an increase of particle emissions by installing a retrofit controller without correct stove specific adjustment of the control parameters and draught conditions (or when sufficient adaptation is not possible at all). Therefore, it is highly recommended that the distribution and installation of retrofit controllers should only be executed by the stove manufacturer or by an original equipment manufacturer in cooperation with the stove manufacturer.



Figure 10: Typical retrofit controller mounted on the central air inlet socket with flue gas temperature sensor and display.

5 Troubleshooting

In the following relevant failures/malfunctions that may happen are described which are of relevance for an automatic control:

- Power blackout •
 - Manual control of stove must still be possible 0
 - Restart of automated control when stove is cooled down 0
- Flap got stuck
 - Consult the user manual for the stove!
- Sensor failure
 - Manual control of stove must still be possible 0
 - Consult the manufacturer of the stove! \cap



6 Safety requirements and legal frameworks

Regarding the safety requirements for automated stoves and retrofit controllers, some critical requirements need to be met if the air supply will be closed completely after stove operation (as recommended here) in order to prevent standing losses. In this case it has to be ensured that there is no release of pyrolysis gases or exhaust fumes into the heated room. It also must be ensured that no dangerous concentrations of unburnt gases can occur in the flue gas. Therefore, the stove shall be highly air tight, and it shall be ensured by appropriate criteria that the flames are extinguished when oxygen supply is shut down completely. Such criteria can be the achievement of a certain temperature or oxygen level in the flue gas.

Another crucial point is that there should be a distinct detection of door openings before, during and after stove operation. This could either be done by door switches or by a certain sensor signal (temperature, O_2 etc.), but the use of a door switch (perhaps as additional feature) is highly recommended, because the other signal indications are less reliable and may thus be more error-prone.

Regarding the framework for market introduction, there is European standardisation work ongoing within CEN TC 295, where the upcoming EN 16510-standard shall be amended by adding a separate part which shall specifically deal with requirements for automated combustion control systems in room heating appliances.

Until this new European standard is achieved there is another option which allows manufacturers to affix the CE marking onto products which are not (yet) based on a harmonised standard. This possibility is given by the ETA (European Technical Assessment) procedure (see Figure 11). More information can be found in the cited download link.



Figure 11: ETA permission procedure (Source: <u>https://www.dibt.de/en/dibt/data/ETA_brochure.pdf</u>, Download date: 30/05/17)



7 Acknowledgement

This project was funded within the ERA-NET Bioenergy programme "Small-scale heat and power production from solid biomass". The project consortium gratefully acknowledges the financial support for carrying out the project provided by:

klima+ energie fonds	Klima- und Energiefonds, Austria
Getördert durch: Bundsministerium Um Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Germany
Energimyndigheten	Swedish Energy Agency

8 Related literature

- HARTMANN H., MACK R., OBERNBERGER I., MANDL C., SCHUESSLER I., 2017: Guidelines for Optimized Stove Concepts. Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "WoodStoves2020", July 2017 www.tfz.bayern.de/mam/cms08/en/dateien/stoves2020guidelines low emission concepts.pdf
- MANDL C., OBERNBERGER I., 2017: Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM). Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "WoodStoves2020", July 2017 <u>www.tfz.bayern.de/mam/cms08/en/dateien/stoves2020-</u> <u>guidelines_Phase_Change_Materials_pcm.pdf</u>
- HARTMANN H., SCHÖN C., TUROWSKI P., OBERNBERGER I., BRUNNER T., BIEDERMANN F., BÄFVER L., FINNAN J., CARROLL J.; 2012: Low Emission Operation Manual for Chimney Stove Users. Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "FutureBioTec", October 2012
- VIRÉN, A.; LAMBERG, H.; TISSARI, J.; SIPPULA, O.; JOKINIEMI, J.; OBERNBERGER, I.; BIEDERMANN, F.; BRUNNER, T.; HARTMANN, H.; SCHÖN, C.; TUROWSKI, P., 2012: Guidelines for Low Emission Chimney Stove Concepts. Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "FutureBioTec", October 2012.
- OBERNBERGER I., BRUNNER, T.; 2015: Guidelines and relevant issues for stove development. Workshop on Highly Efficient and Clean Wood Log Stoves within the IEA Bioenergy Conference, October 2015, Berlin, Germany; <u>http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2015_Berlin/index.html</u>
- MANDL C., BRUNNER T., OBERNBERGER I., KOESSL M., 2013: Optimisation of Logwood Fired Stoves by Means of Innovative Primary Measures. In: Proc. of the 21st European Biomass Conference and Exhibition, June 2013, Copenhagen, Denmark, ISBN 978-88-89407-53-0 (ISSN 2282-5819), pp. 562-567, (paper DOI



10.5071/21stEUBCE2013-2CO.4.4), ETA-Florence Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy

9 Useful sources for further information

Manufacturers of sensors:

- LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG: <u>https://www.lamtec.de/de/</u>
- 1. NGK Spark Plug Co., Ltd.) <u>https://www.ngksparkplugs.com/</u> <u>http://www.hs-kabeltechnik.at</u>
 - LogiDataTech electronic GmbH und LogiDataTech systems GmbH & Co. KG (formerly J. Dittrich Elektronic GmbH & Co. KG) <u>https://logidatatech.com/de/</u>
 - SenSiC AB: <u>http://sensic.se/</u>
 - Scan Tronic Aps: <u>http://www.scan-tronic.dk/</u>

Certification schemes and labels for stoves:

- Nordic Ecolabel for stoves (Scandinavian countries): <u>http://www.svanen.se/en/Find-products/Product-search/?categoryID=100067</u>
- DIN_{plus} label for stoves (Germany)
 <u>http://www.dincertco.de/de/kaminoefen_pelletoefen_heizeinsaetze_herde_und_sonsti</u>
 <u>ge_haeusliche_heizgeraete.html</u>
- Austrian Umweltzeichen UZ 37
 <u>https://www.umweltzeichen.at/cms/de/produkte/gruene-energie/content.html</u>
- Ecodesign and Energy Labelling (Directive 2009/125/EC) Local space heaters: <u>https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-</u> <u>standards/ecodesign/solid-fuel-local-space-heater_en</u>

Anhang D



Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM)



Authors:

Christoph Mandl, Ingwald Obernberger BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Austria

> Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "Woodstoves2020" – Development of Next Generation and Clean Wood Stoves

> > July 2017



Bioenergy Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM)

<u>Disclaimer</u>

The concepts and design guidelines presented are a result of a scientific project. The implementation and utilisation of the research results is the decision of each individual person/company. The authors undertake no liability for the utilisation and implementation of the research work and research results as well as for consequences of the resulting technology development or plant operation.

Contact: BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH Hedwig-Katschinka-Straße 4, A-8020 Graz, Austria Email: office@bios-bioenergy.at Tel.: +43 316 481300-27 www.bios-bioenergy.at

Download of Guidelines: http://www.tfz.bayern.de/en/162907/index.php

Bioenergy Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM)

Preface

ERA-NET Bioenergy is a network of national research and development programmes focusing on bioenergy which includes 14 funding organisations from 10 European countries: Austria, Denmark, Finland, France, Germany, Ireland, The Netherlands, Poland, Sweden and the United Kingdom. Its mission is to enhance the quality and cost-effectiveness of European bioenergy research programmes, through coordination and cooperation between EU Member States. The project *Woodstoves2020* (Development of next generation and clean wood stoves) has been supported in the period between August 2014 and July 2017 by ERA-NET Bioenergy under the 7th Joint Call for Research and Development of ERA-NET Bioenergy from 2013.

Today small-scale biomass combustion is one of the most relevant bioenergy applications. Driven by EU-wide and national measures to promote the utilisation of biomass for energy production, the European market for biomass based residential heating systems is expected to substantially increase by about 130% until 2020 (based on 2009). Regarding the installed units stoves show the highest and steadily increasing numbers in Europe. According to market studies performed within the EU FP7 project EU-UltraLowDust (Project No. 268189), in 2020 in Europe a potential for an annual installation of almost 2,200,000 stoves (logwood and pellet stoves) is forecasted.

This additional potential for renewable energy production will of course contribute to a reduction of the EU greenhouse gas emissions. However, it is also well known that among the different residential biomass combustion technologies logwood stoves show the highest CO, OGC and fine particulate matter (PM) emissions.

Against this background, the project *Woodstoves2020* aims at the development of innovative measures and technologies in order to further reduce emissions from wood stoves, to increase their thermal efficiency and to expand their field of application from solely single room heating to central heating. The latter could especially be of relevance for future applications in low energy buildings.

Accordingly, the detailed objectives of the project can be structured as follows.

Objectives related to emission reduction

- Development and implementation of automated control systems for stoves as a feature of new stoves but also as retrofit units for existing models. Automated control systems can help to widely eliminate user induced operation errors and therefore have a huge potential for emission reduction.
- Evaluation and test of new high-temperature catalysts specially adapted to wood stoves for efficient CO, OGC and soot emission reduction. Catalysts should be implemented in new stove concepts as a basis for an ultra-low emission operation which could be comparable to the emission level of automated small-scale boilers.
- Evaluation and test of foam ceramic materials for efficient PM emission reduction.
- Evaluation of the implementation of modern chimney draught regulators.

Objectives related to increasing efficiency and new fields of application

• Development and evaluation of efficient and novel heat storage options for stoves such as the application of PCM (phase change material) with high heat storage potential.


• Investigations regarding efficient heat recovery from stoves (increase of efficiency by the implementation of heat storage units or measures to stabilise the draft or to reduce standing losses).

Objectives related to the implementation and evaluation of the different measures

- Test of the most promising concepts by performing test runs with prototypes.
- Development of design guidelines for stove manufacturers based on the evaluation of the new technologies tested towards a clean stove technology 2020.
- Development of guidelines for the implementation and retrofit of selected measures for old stoves.

With the new technologies developed within the project an emission reduction between 50 and 80% and an increase of the efficiencies in a range above 90% shall be possible. If in future all newly installed wood stoves in Europe would be equipped with these new technologies, a PM emission reduction of 60 - 90% could be achieved.

In order to reach these objectives, a consortium of 4 research organisations and 4 industrial partners from 4 European countries collaborated within Woodstoves2020 (see next page).

This document summarises the outcomes of the investigations regarding the development of heat storing stoves based on Phase Change Materials (PCM) with increased efficiency.

It should support stove manufacturers concerning the optimisation of their products and the development and design of new products with its recommendations which have been worked out based on scientific investigations as well as comprehensive test runs.



Woodstoves2020 project partners

Project coordinator

Technologie- und Förderzentrum	Technology and Support Centre in the Centre of Excellence for Renewable Resources (TFZ) Straubing, Germany

Project partners (R&D)

	BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH Graz, Austria
R	RISE Research Institutes of Sweden AB Borås, Sweden
DTU	Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Lyngby, Denmark

Industrial partners

RIKA	RIKA Innovative Ofentechnik GmbH Micheldorf, Austria
KUTZNER + WEBER	Kutzner + Weber GmbH Maisach, Germany
NIBE	Nibe AB, Markaryd, Sweden
HUJAM intelligent heat	HWAM A/S, Hørning, Denmark



Table of contents

1	l	Introduction and objectives1
	1.1	Target group 1
2	I	Definitions and limitations1
	2.1	Definition of chimney stoves1
	2.2	Limitations 2
3	I	Basics/Fundamentals of heat storage based on PCM2
	3.1	Advantages and potentials of heat storage based on PCM
	3.2	Challenges for heat storage based on PCM
	3.3	State-of-the-art of heat storage based on PCM 4
	3.4	Evaluation and selection of a suitable phase change material
4	I	Heat storage units for wood stoves based on PCM6
	4.1	Basis concepts and design6
	4.2	CFD-aided design of heat storage units 8
	4.3	Typical operation procedure
	4.4	Development status and market introduction10
5		Acknowledgement12
6	l	Related literature12
7	I	Useful sources for further information13

1 Introduction and objectives

Today small-scale biomass combustion is one of the most relevant bioenergy applications. Driven by EU-wide and national measures to promote the utilisation of biomass for energy production, the European market for biomass based residential heating systems is expected to substantially increase by about 130% until 2020 (based on 2009). Furthermore, small-scale residential biomass combustion for space heating and warm water production holds a considerable share on the total energy production from biomass (about 50% in 2014 within the EU 28) [1]. Regarding the installed units stoves show the highest and steadily increasing numbers in Europe. However, even modern stoves show clearly lower thermal efficiencies (in the range of 82% under test stand conditions) [2] in comparison to automatically fed and controlled biomass boilers (e.g. pellet boilers). Heat storing stoves (or appliances with integrated heat storage unit) may show significantly increased efficiencies and therefore also contribute to a better economy of stove technologies. Moreover, they contribute to a better climate in the rooms as the energy released to the room can be better distributed over a rather long period in comparison to state-of-the-art wood log stoves.

Innovative compact thermal energy storage technologies are based on the physical principles and properties of phase change materials (PCM) and on thermochemical materials (TCM). With these materials, heat can be stored in a denser form than in e.g. hot water storage tanks.

Data from the literature and comprehensive experimental work as well as from CFD simulations form the basis of this guideline. The guideline aims at supporting manufacturers in the development of heat storing stoves or stoves with heat storage units as add-on options.

1.1 Target group

This guideline provides information primarily for stove developers and manufacturers to use the presented concept for the development of heat storing stoves with increased efficiency. Furthermore, the report should also be of interest to researchers, stove users and policy makers.

2 Definitions and limitations

2.1 Definition of chimney stoves

The present guidelines cover heat storage units for residential chimney stoves. The following features apply to a chimney stove (Figure 1).

- It is a free standing room heater, not walled, and usually with a front window.
- Only a relatively small amount of heat storage is possible due to the low mass of the stove, but heat storage devices could be added to the stove in order to improve the efficiency
- Fuel is charged in a single layer onto the bed of embers (typically logwood).

1

- Therefore: frequent re-charging is required.
- Heat is released by radiation from the window or from other surfaces and by convection via air ducts and outlets.





2.2 Limitations

Tiled stoves, open fire places, cooking stoves, all stoves with water jackets, pellet stoves and sauna stoves are not covered in this guideline.

Apart from all practical questions concerning heat storage and increasing the efficiency, further technical improvements are also possible, e. g. by a better stove design or by automated control. But such primary and secondary measures are separately presented in other guidelines which have also been prepared during this ERA-NET-project (see [12] and [13]).

3 Basics/Fundamentals of heat storage based on PCM

Heat storages (thermal energy storage) allow to store heat energy in a reversible process and to use the stored energy for heating a house by slow heat release during the times when the stove is not in operation, given that the heat has previously been produced over a typical number of subsequent combustion batches (3 to 6). Regarding heat storage, the following storage methods can be distinguished [3]:

- Sensible heat storage (e.g. water storage tanks)
- Latent heat storage (e.g. based on phase change materials)
- Thermochemical heat storage (e.g. silica gel, metal hydride, zeolite)

Sensible heat storage systems are the most commonly used method for heat storage. In such heat storages the temperature of a storage medium (e.g. hot water tank) increases when heat is supplied and sensible heat is stored. If the storage is cooled again, the temperature decreases and the stored heat is released.

Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM) In latent heat storage systems the heat supplied can also be stored as latent heat in addition to sensible heat. If a solid is heated to the melting point and heat is further supplied, the solid starts to melt while the temperature remains constant (isothermal phase conversion). The heat required to change the state (heat of fusion) is called latent heat. Only after the phase transformation has been completed, a further temperature increase of the material and furthermore storage of sensible heat takes place. By cooling the molten material the temperature drops again to the solidification point. When the material is further cooled, the previously molten material is again transferred to the solid state. The latent heat (required for melting) is released again at constant temperature.

Thermochemical heat storages are based on the heat storage by means of chemical reactions. The difference between the enthalpy of the reactants and the reaction products formed during a chemical reaction is called heat of reaction. If heat is released during the chemical reaction (negative reaction enthalpy), this is called an exothermic reaction. If heat (energy) is consumed during the chemical reaction (positive reaction enthalpy), this is called an endothermic reaction.

Chimney stoves currently available on the market with integrated heat storage (storage fireplace ovens) are equipped with a heat storage typically based on soap stone. Since only the sensible heat can be stored with a soap stone, such solutions are usually heavy or voluminous, whereby their residential application is limited. PCMs (Phase Change Materials) enable a more efficient energy recovery from the flue gas as they usually show low melting temperatures, whereby also the latent heat can be stored in addition to the sensible heat. This guideline focuses on heat storage based on PCM due to their innovative approach, compact format and since PCMs have been investigated in detail within this ERANET project.

3.1 Advantages and potentials of heat storage based on PCM

The main advantage of heat storing stoves based on PCM is their significantly increased efficiency as also latent heat can be stored in addition to sensible heat (efficiencies in a range above 90% shall be possible). Moreover, these stoves contribute to a better climate in the rooms as the stored heat released to the room can be better distributed over a rather long period in comparison to state-of-the-art wood stoves. Furthermore, as also the latent heat can be stored in addition to the sensible heat an implementation of the PCM heat storage into the stove in a compact way may be possible. Concluding, heat storage based on PCM can show valuable advantages and potentials:

- increase the thermal efficiency
- also latent heat can be stored
- slow heat release
- higher comfort for customer
- better room climate

3.2 Challenges for heat storage based on PCM

A large number of different materials and material mixtures are basically suitable for heat storage based on PCM (see Figure 2).

Bioenergy Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM)



Figure 2: Overview over possible Phase Change Materials (source: [4])

In theory, any material that has a solid-liquid phase transition and a correspondingly high enthalpy of fusion can be used as PCM. However, properties such as heat capacity, density, risk class, availability and price are also relevant for the use of PCMs as heat storage in wood stoves. Moreover, the melting point of the storage material should not be too high as the latent heat storage should be available even during a partial loading of the heat storage. A high density and a high heat capacity of the PCM are important as the heat storage should be compactly integrated into the stove. Concluding, the following criteria are the main challenges for heat storage based on PCM:

- not flammable
- no thermal degradation
- high heat capacity
- high density
- melting point in a suitable range for stoves (150 300 °C)
- economically attractive
- not corrosive
- not toxic

3.3 State-of-the-art of heat storage based on PCM

The majority of the commercially available latent heat storage materials are used in the lowtemperature range up to a melting point of 150 °C. These materials are already used for various applications and are therefore well developed and tested [5]. Simple and relatively well known low temperature applications of heat storage based on PCM (sodium-acetatetrihydrate) are heat pads and pocket warmers [4]. A form which has long been used industrially is ice water storage in cold-storage systems. In solar heating systems, PCM heat accumulators are used to increase the storage capacity of buffer storage (hot water storage)



by inserting a multiplicity of small containers filled with paraffin into the buffer storage, which store latent heat at a temperature of around 60 °C and, if necessary, can return to the water in the buffer storage. However, these PCMs are not suitable for the intended application for heat storage in a logwood stove due to their low melting points and limited thermal stability and have therefore not been further considered.

High-temperature PCM heat storages are used for storing high-temperature heat energy for process steam generation for industrial plants or Concentrating Solar Power (CSP) in solar thermal power plants [6, 7, 8]. Other PCM applications, which are already close to market introduction, include storage of engine exhaust heat from motor vehicles for engine preheating during cold start, the integration of PCMs into building materials to reduce heat and cooling demands of buildings as well as the application of PCMs as protection against overheating of sensitive electronic components, data carriers and valuables in case of fire [9].

3.4 Evaluation and selection of a suitable phase change material

As many different types of phase changing materials (PCM) are available on the market, the applicability of these materials for the heat storage in wood stoves has to be evaluated in detail. The following evaluation criteria of phase change materials applied for heat storage units in wood stoves have been considered:

- costs •
- thermal degradation behaviour •
- heat conductivity
- heat capacity
- density
- toxicity •
- flammability •
- corrosion potential •

A high density and heat capacity of the PCM are important as the heat storage unit should be realised in a dense and compact way. The evaluated PCMs have to be suitable for the application in a heat storage unit (e.g. flue gas heat exchanger) of wood stoves. Accordingly, some basic criteria limit the applicability of these PCMs. These criteria were defined as follows:

- Melting temperature: 150 300 °C •
 - Should be determined in a way that complete melting can be achieved within 0 a representative number of batches. This can be evaluated by CFD simulations (see chapter 4)
- Degradation temperature: > 600 °C
 - maximum achievable temperature of stove materials can be evaluated by 0 CFD simulations and depends on the isolation applied (see chapter 4)
- The price should be as low as possible in order to be economically competitive

• The material should not be corrosive or toxic under operation conditions

The results of an evaluation performed are summarised in Table 1. As shown there are several PCMs suitable for heat storage in wood stoves. The final selection of the PCM depends on the stove applied.

name	chemical formula	group	melting point	ng heat of fusion		boiling point	start of degradation	spec. heat capacity		thermal conductivity		density		toxicity / flammability
-	-	-	-	-	-	-	-	solid	liquid	solid	liquid	solid	liquid	-
-	-	-	°C	kJ/kg	kJ/dm ³	°C	°C	kJ/(kg*K)	kJ/(kg*K)	W/(m*K)	W/(m*K)	kg/dm ³	kg/dm ³	-
salts and salt mixtu	res													
Lithium nitrate	LINO3	salt	254	360	782	-	>600	1.45-1.88	1.88-2	1.4	0.6	2,1716	1,78	oxidising may cause irritation
eutectic mixture potassium nitrate(54)- sodium nitrate(46)	KNO3-NaNO3	salt mixture	222	100	205	-	600	1.0-1.37	1.37-1.48	0.7	0.5	2,0475	1,95	oxidising cause irritation harmful to health
eutectic mixture potassium nitrate(67)- lithium nitrate (33)	KNO3-LiNO3	salt mixture	133	170	368	-		1.1	1.2			2,166	1,9	oxidising
eutectic mixture lithium nitrate(49)- sodium nitrate (51)	LiNO3-NaNO3	salt mixture	194	265	569	-		1.2-1.39	1.39-1.53		0.5	2,147	1,9	oxidising cause irritation harmful to health
lithium nitrate(55,4)- sodium nitrate(4,5)- potassium chloride(40,1)	LiNO3-NaNO3-KCl	salt mixture	160	266	507							1,905		oxidising cause irritation harmful to health
lithium nitrate(58,1)- potassium chloride(41,9)	LINO3-KCI	salt mixture	166	272	522							1,918		oxidising may cause irritation
lithium nitrate(47,9)- lithium chloride(1,4)- sodium nitrate(50,7)	LiNO3-LiCI-NaNO3	salt mixture	180	267	530							1,986		oxidising cause irritation harmful to health
LiCl (59.15mol%)- Ca(NO3)2(40,85mol%)	LiCI-Ca(NO3)2	salt mixture	270	167										
NaCl(7,8mol%)- NaOH(85,8mol%)- NaCO3(6,4mol%)	NaCI-NaOH-NaCO3	salt mixture	282	316										
NaCl(8mol%)-NaF(5mol%)- NaNO3(87mol%)	NaCl-NaF-NaNO3	salt mixture	288	224										
Yara Ca(NO3)2(42)-NaNO3(15)- KNO3(43)	Ca(NO3)2-NaNO3-KNO3	salt mixture	131	44			570	1,6	1.45 - 1.55	n.a.	n.a	1,9	1,9	oxidising cause irritation harmful to health

Table 1: Evaluation results of different PCMs (example)

4 Heat storage units for wood stoves based on PCM

Appropriate heat exchangers for the heat transfer from the flue gas to the PCM (loading cycle) and for heat transfer from the PCM to convection air (unloading cycle) are necessary. The heat exchanger should be combined with (or integrated into) the stove concept in a way that a large share of the energy produced is transferred to the PCM.

4.1 Basis concepts and design

Generally, different concepts of heat exchangers are suitable as heat storage units based on PCM. The heat storage unit can be placed e.g. on top of the wood log stove (see Figure 3). Moreover, the heat storage unit (heat exchanger) can be positioned laterally (on one or on both sides) or at the back side of the stove. However, the heat exchanger should be integrated into the stove concept in a way that a large share of the energy produced is transferred to the PCM in order to ensure a high efficiency (up to 90% according to DIN EN 13240).

The release of the stored heat (unloading cycle) can be realised

- Via convection air channels which are opened at the end of operation of the stove. Thus, the stored heat can be distributed even to different rooms (see Figure 4).
- Via slow natural convection over a larger time duration which is of advantage for the comfort of living (see section 4.3)



Figure 3: Scheme of the wood log fired stove with integrated heat storage device – 3D view (source: [10])

A good isolation of the PCM heat storage unit is of great relevance:

- It leads to a smaller heat release during the loading phase (share of stored heat can be increased). Generally, 25 to 50 % of the fuel power input should be stored into the PCM heat storage unit.
- The heat storage unit slowly releases the stored heat due to its improved isolation. The heat release from the stove (with integrated heat storage unit) is reduced and gets discharged over a longer period of time (e.g. a whole day) which is of advantage for the comfort of living.



Figure 4: Scheme of a PCM heat exchanger concept with convective air channels (source: BIOS)

The increase of efficiency can be further enhanced by new automatically operating components for air and flue gas control (including complete closure of flaps after shutdown). Beyond the increased efficiency due to a PCM heat storage unit this can further reduce standing losses, which may have a significant impact on the annual system efficiency. As

7

ERA-NET

Bioenergy Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM)

higher efficiencies lead to lower fuel consumption, a strong argument is also provided for users to switch from old to new stove technologies with integrated heat storage units.

The development of a PCM heat storage device can be accompanied and supported by CFD simulations in order to evaluate the performance of the heat storage device. By applying CFD simulations the stove including the heat storage geometry can be optimised more effectively than by trial-and-error test runs.

4.2 CFD-aided design of heat storage units

BIOS has developed an innovative CFD model for wood log fired stoves operated in batch mode consisting of an empirical model for wood log combustion and CFD models for the turbulent reactive flow and heat transfer in the stove [11]. However, the combustion of wood logs in small-scale stoves is a highly transient and complex process, as a wood log stove is operated in batch mode with every batch consisting of a starting, a main combustion and a burnout phase. The transient character of the operation of wood log stoves becomes even more important, when a heat storage system is included. In this case, steady-state conditions do not apply, as the operation of a heat storage device is divided into 3 phases: heat-up, heat storage (without charging) and heat release (discharge).

Therefore, BIOS has developed an innovative CFD simulation methodology including a transient simulation of the system [10]. Thus, it is possible to derive and discuss the thermal behaviour of a heat storage device coupled to a wood log fired stove during the heat-up and discharge phase. Moreover, the influence of the air-flow in the discharging channels and the flue gas flow in the charging channels as well as material properties on the charging/discharging processes can be evaluated.

In Figure 5 the surface temperatures of a PCM heat storage unit (similar to Figure 4), laterally coupled to a wood log fired stove (on both sides), are depicted as an example.

The maximum temperature of the PCM can be up to 477 °C for the specific stove investigated and should be significantly lower than the degradation temperature of the selected PCM. The minimum temperature of the PCM is in the steady state 263 °C and it should be above the melting temperature of the selected PCM.

By these innovative CFD methods wood stoves with integrated heat storage units can be optimised more effectively than by trial-and-error test runs. They constitute a powerful tool for the support of the development of new stove concepts and the evaluation and optimisation of heat storage units. Moreover, it contributes to a better understanding of the underlying processes and thus to a more efficient system optimization. The application of such simulations considerably reduces the effort for test runs and ensures a time-efficient and targeted solution finding.



Figure 5: Iso-surfaces of material temperature [°C] in the heat storage unit (steady state after complete charging); 3D view from the left and right side hand of the air channels (source: BIOS)

4.3 Typical operation procedure

The PCM heat storage unit is loaded during the normal operation of the stove. The hot flue gas passes through the PCM heat storage (heat exchanger), sensible heat is transferred to the PCM and the PCM temperature increases continuously. As soon as the PCM starts to melt, also the latent heat can be stored in addition to the sensible heat. Figure 6 shows the energy balance of a typical loading cycle of a wood stove with integrated heat storage unit based on PCM (6 batches at nominal load including the ignition batch):

- Up to 50% of the total fuel power input can be stored in the stove and the PCM heat storage unit, which represents a very attractive value.
- The flue gas losses are low due to the efficient heat storage of the PCM an efficiency of 90% (according to EN 13240) can be reached for the entire loading cycle





Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM) Figure 7 shows a typical unloading cycle (natural convection only) of a wood stove with integrated heat storage unit based on PCM. The air flaps of the stove have been closed at the end of the stove operation (6 batches including ignition batch). This is of relevance in order to reduce standing losses. During the unloading cycle the stove cools down rather quickly. On the contrary, the PCM heat exchanger slowly releases the stored heat due to its improved isolation. After 9 h (duration of the night) up to 20 % of the stored energy in total are still available from the stove and the PCM heat exchanger. The heat release from the stove is reduced and gets discharged over a longer period of time which is of advantage for the comfort of living. By controlling the convective air flow through the heat storage unit the period of heat release can be influenced.



Figure 7: Unloading cycle of a wood stove with integrated heat storage unit based on PCM by natural convection (source: BIOS)

4.4 Development status and market introduction

Based on a new stove concept of RIKA a design for an integrated heat storage system based on PCM has been developed. The development of the stove with integrated PCM heat exchanger has been accompanied and supported by CFD simulations of BIOS in order to evaluate and pre-optimise the new technology. The new wood stove with integrated PCM heat exchanger has been constructed by RIKA and two first prototypes have been erected and comprehensively tested (see Figure 8). The market introduction of the new heat storage technology is expected for 2018.



Figure 8: Picture of the new stove technology with integrated heat storage unit based on PCM (the new stove concept is protected by a patent) (source: RIKA)

5 Acknowledgement

This project was funded within the ERA-NET Bioenergy programme "Small-scale heat and power production from solid biomass". The project consortium gratefully acknowledges the financial support for carrying out the project provided by:

klima+ energie fonds	Klima- und Energiefonds, Austria
Getördert durch: Bundsministerium Srachgenter Nachwachande Rohatoffe a.V. Getördert durch: Bundsministerium und Landwirtszohn aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Germany
Energimyndigheten	Swedish Energy Agency

6 Related literature

- 1. [1] AEBIOM, 2017: Website, http://www.aebiom.org/, European Biomass Association, Brussels, Belgium, retrieved [05.04.2017]
- 2. EU FP 7 project UltraLowDust (Project No. 268189)
- HAUER A., 2016: Überblick zu internationalen F&E Aktivitäten und Anwendungsfällen für kompakte thermische Energiespeicher.
 Tagung "Kompakte thermische Energiespeicher", Vienna, Austria, 14.09.2016
- Hengstberger F., 2016: Kostengünstige organische Phasenwechselmaterialien f
 ür industrielle Speicheranwendungen. 2. Tagung "Kompakte thermische Energiespeicher", Vienna, Austria, 14.09.2016
- 5. Moser C., 2014: Saisonale Wärmespeicherung auf Basis von Phasenwechselmaterial, In: Erneuerbare Energie Zeitschrift für eine nachhaltige Energiezukunft, vol: 3 (2014), pp. 10-13
- 6. IEA SHC Task 42, 2015: Compact Thermal Energy Storage: Material Development for System Integration, IEA SHC Task 42, August 2015
- GIL A., MEDRANO M., MARTORELL I., LAZARO A., DOLADO P., ZALBA B., CABEZA F. L., 2010: State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 - Concepts, materials and modellization. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) pp. 31–55
- MEDRANO M., GIL Antoni, MARTORELL I., POTAU X., CABEZA F. L., 2010: State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 2 – Case Studies. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) pp. 56–72
- 9. Sharma A., Tyagi V.V, Chen C.R., Buddhi D., 2009: Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) pp. 318-345
- 10. BENESCH C., BLANK M., SCHARLER R., KOESSL M., OBERNBERGER I., 2013: Transient CFD Simulation of Wood Log Stoves with Heat Storage Devices. In: Proc. of the 21st European Biomass Conference and Exhibition, June 2013, Copenhagen,

12

13 ERA-NET

Bioenergy Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM)

Denmark, ISBN 978-88-89407-53-0 (ISSN 2282-5819), pp. 578-584, (paper DOI 10.5071/21stEUBCE2013-2CO.7.1), ETA-Florence Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy

- Scharler R., Benesch C., Neudeck A., Obernberger I., 2009: CFD based design and optimisation of wood log fired stoves. In: Proc. of the 17th European Biomass Conference, June 2009, Hamburg, Germany, ISBN 978-88-89407-57-3, pp. 1361-1367, ETA-Renewable Energies (Ed.), Florence, Italy
- 12. Hartmann H., Mack R., Obernberger I., Mandl C., Schuessler I, 2017: Guidelines for Optimized Stove Concepts. Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "WoodStoves2020", July 2017 www.tfz.bayern.de/mam/cms08/en/dateien/stoves2020guidelines_low_emission_concepts.pdf
- Mandl C., Obernberger I., Hartmann H., Mack R., Schuessler I., Illerup J, 2017: Guidelines for automated control systems for stoves. Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project "WoodStoves2020", July 2017 www.tfz.bayern.de/mam/cms08/en/dateien/stoves2020guidelines_automated_control_systems.pdf

7 Useful sources for further information

IEA Solar Heating & Cooling Programme: Website: http://www.iea-shc.org/

IEA Task42 - Compact Thermal Energy Storage: Website: http://task42.iea-shc.org/