

57

Berichte aus dem TFZ

Optimierungspotenziale bei Kaminöfen

Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste



Optimierungspotenziale bei Kaminöfen Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste



Optimierungspotenziale bei Kaminöfen

Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste

Mitarbeiter

Robert Mack
Dr. Daniel Kuptz
Claudia Schön
Dr. Hans Hartmann

Berichte aus dem TFZ 57

Straubing, August 2018

Titel: Optimierungspotenziale bei Kaminöfen

Projektleiter: Dr. Hans Hartmann

Autoren: Robert Mack
Dr. Daniel Kuptz
Claudia Schön
Dr. Hans Hartmann

Mitarbeiter: Elisabeth Rist
Benedikt Haas
Albert Maierhofer
Stephan Winter
Alexander Marks
Thomas Kießlinger

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 22016813 gefördert. Die 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.

© 2018
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, Dr. Daniel Kuptz, Dr. Hans Hartmann, Ulrike Ammer
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2018
Gestaltung: Robert Mack, Dr. Hans Hartmann

Fotonachweis: Robert Mack; Leonhard Büttner (Abbildung 1)

Danksagung

Der vorliegende Bericht „Optimierungspotenziale bei Kaminöfen“ umfasst die Ergebnisse des europäischen Forschungsprojekts „Development of Next Generation and Clean Wood Stoves“ (Eranet Wood Stoves 2020), die über den Zeitraum von knapp drei Jahren durch das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) in Zusammenarbeit mit der Firma Kutzner und Weber GmbH gewonnen wurden.

Besonderer Dank gilt der Firma Kutzner und Weber GmbH sowie den Firmen ATech elektronika d.o.o, Camina & Schmid Feuerdesign und Technik GmbH & Co. KG, Linder-Katalysatoren GmbH und HARK GmbH & Co. KG für die kostenlose Bereitstellung der zur Durchführung der Versuche benötigten Steuerungen, Zugbegrenzer, Katalysatoren und Öfen.

Weiterhin bedanken wir uns bei allen europäischen Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit und den effektiven Wissenstransfer.

Die Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 22016813 gefördert. Die Mittelvergabe erfolgte über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR).

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis.....	13
1 Einleitung	15
2 Stand der Technik	17
2.1 Typischer Aufbau eines modernen Kaminofens.....	17
2.2 Rechtlicher Hintergrund	18
2.3 Anzahl an Einzelraumfeuerungen in der Bundesrepublik Deutschland	21
2.4 Einflüsse auf das Emissionsverhalten von Kaminöfen.....	22
3 Zielsetzung und Aufbau des Projekts	25
4 Material und Methoden	29
4.1 Beschreibung der verwendeten Feuerungen	29
4.2 Prüfstands Aufbau und Messtechnik.....	29
4.3 Bestimmung von Wassergehalt, Glühverlust, Aschegehalt und Elementaranalyse	31
4.4 Eingesetzte Filter-, Dummy- und Katalysatorelemente	31
4.5 Eingesetzte Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbegrenzer	33
4.6 Abgestimmte Prüfmethode für optimierte Ofenkonzepte und Bauteile zur Optimierung von Öfen	34
4.7 Statistische Analysen der Messergebnisse.....	47
5 Test und Bewertung des Langzeitverhaltens von Schaumkeramikfiltern in Kaminöfen und deren Ersatz durch Katalysatoren.....	49
5.1 Vorversuche zur Luftströmung im Kaminofen	49
5.2 Langzeitverhalten von nicht katalytisch beschichteten Schaumkeramikelementen	50
5.3 Ersatzes der Schaumkeramikelemente durch katalytisch beschichtete Schaumkeramikelemente	53
5.4 Langzeitverhalten des Katalysators	59
5.5 Zusammenfassende Bewertung (katalytische vs. nicht katalytische Schaumkeramik	64
6 Quantifizierung von Stillstandverlusten über den Schornstein sowie Bewertung von Minderungsmaßnahmen an Öfen	67

6.1	Kalte Stillstandverluste	67
6.2	Verluste während des Abkühlvorgangs nach dem Betrieb des Kaminofens (warme Stillstandverluste).....	72
6.3	Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung von Stillstandverlusten	76
7	Prüfung und Bewertung nachrüstbarer Verbrennungsluftsteuerungen und Zugluftbegrenzer.....	81
7.1	Einfluss der nachrüstbaren Steuerungen und Zugluftbegrenzer auf das Emissionsverhalten	82
7.2	Einfluss der nachrüstbaren Steuerungen und Zugbegrenzer auf den Wirkungsgrad von Kaminöfen	87
7.3	Zusammenfassende Bewertung der Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbegrenzer	89
8	Methodenvergleich zur Untersuchung der unverbrannten Rückstände aus Kaminöfen hinsichtlich ihres Energieinhaltes.....	93
8.1	Vergleich von Analysemethoden für unverbrannte Rückstände	93
8.2	Zusammenfassende Bewertung der Methoden zur Rückstandsbewertung.....	100
9	Einfluss des Förderdrucks auf Wirkungsgrad und Emissionen	101
9.1	Einfluss des Förderdrucks auf Emissionen	101
9.2	Einfluss des Förderdrucks auf den Wirkungsgrad.....	103
9.3	Zusammenfassende Bewertung des Einflusses des Förderdrucks auf Wirkungsgrad und Emissionen.....	104
	Zusammenfassung	105
	Abstract	109
	Quellenverzeichnis	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau eines Kaminofens nach Stand der Technik [30].....	17
Abbildung 2:	Wirkungsplan eines Systems mit offenem Wirkungsweg (Steuerkette).....	23
Abbildung 3:	Wirkungsplan eines Systems mit geschlossenem Wirkungsweg (Regelkreis).....	24
Abbildung 4:	Maßnahmen bzw. Ansatzpunkte, die im Rahmen des Projekts „Wood Stove 2020“ untersucht bzw. entwickelt wurden.....	25
Abbildung 5:	Prüfstands Aufbau und Anordnung der Messstellen für die Kaminofenmessungen mit geregelterm Zug (links) und mit Naturzugschornstein (rechts).....	30
Abbildung 6:	Geprüfte Schaumkeramik-Elemente: unbenutzt (links), 200 Abbrände (Mitte), 550 Abbrände (rechts).....	32
Abbildung 7:	Katalytisch beschichtete Schaumkeramik (links), „Dummy“ Element für vergleichbare Strömungsbedingungen (Druckverluste) im Kaminofen (rechts).....	32
Abbildung 8:	Überprüfung der Übereinstimmung der Druckverluste über den Normvolumenstrom der drei eingesetzten Elemente.....	33
Abbildung 9:	Schematischer Ablauf eines Prüfzyklus (PM: Gesamtstaubmessung; (PM): optionale Gesamtstaubmessung).....	36
Abbildung 10:	Beispiel eines Quick-User-Guides für den Kaminofen Hark 44 GT ECOplus (erstellt vom TFZ im Rahmen des „beReal“-Projekts [44]).....	39
Abbildung 11:	Spülen der Probenahmesonde nach der Staubbmessung.....	42
Abbildung 12:	Exemplarischer Prüfstands Aufbau für die Katalysatormessung mit geteiltem Abgaskanal.....	46
Abbildung 13:	Vorversuche zum Strömungsverhalten: Schritt 2: Schaumkeramik abgeklebt (links), Schritt 4: alle undichten Stellen abgeklebt, Klebeband von Schaumkeramik wieder entfernt (rechts).....	49
Abbildung 14:	Gasförmige Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der drei untersuchten nicht katalytisch beschichteten Schaumkeramik-Paare im Vergleich.....	51
Abbildung 15:	Gesamtstaubemissionen der drei untersuchten Schaumkeramik-Paare im Vergleich.....	51
Abbildung 16:	Spülen der Schaumkeramikplatten und anschließendes Abdampfen der Spülflüssigkeit.....	52
Abbildung 17:	Vergleich der CO-Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ Dummy).....	54

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)	54
Abbildung 19: Vergleich der CH ₄ -Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ Dummy)	55
Abbildung 20: Maximale und minimale Temperaturen sowie durchschnittliche Temperaturen während der Messung bei Nenn- bzw. Teillast	56
Abbildung 21: Vergleich der Gesamtstaubemissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ Dummy)	57
Abbildung 22: Vergleich der NO _x -Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ Dummy)	58
Abbildung 23: Optimierungsmaßnahmen vor dem Langzeitversuch: Nachrüstung einer Temperatur- und Druckmessstelle im Feuerraum und Abdichten der undichten Stellen mit feuerfestem Keramikkleber	59
Abbildung 24: CO-Emissionen der Langzeitmessung (zwölf Werktage mit jeweils acht Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus drei Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11) dar.....	60
Abbildung 25: Nicht-CH ₄ -Org.-C-Emissionen der Langzeitmessung (zwölf Werktage mit jeweils acht Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus drei Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11) dar.....	61
Abbildung 26: Gesamtstaubemissionen der Langzeitmessung (zwölf Werktage mit jeweils acht Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus drei Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11) dar	62
Abbildung 27: Vergleich der CO-Emissionen von Dummy und Katalysator vor und nach dem Abdichten mit feuerfestem Keramikkleber	63
Abbildung 28: Druckverluste über den Katalysator und Dummy während des Langzeitversuchs	63
Abbildung 29: Grafische Darstellung der Messdaten des Monitorings von Kaminofen B (Messungen ohne Heizbetrieb)	69
Abbildung 30: Vergleich des Abkühlvorgangs von Kaminofen A nach acht Abbränden bei geöffneten und geschlossenen Zuluftklappen	73
Abbildung 31: Lineare Regression der Wärmeverluste aller gemessenen Klappenstellungen zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Abgas während des Abkühlvorgangs von Kaminöfen A	76
Abbildung 32: Extrapolation der Summe der Stillstandverluste bei kaltem Schornstein und während des Abkühlvorgangs nach dem Heizbetrieb in Abhängigkeit der Tage mit Heizbetrieb.....	77

Abbildung 33:	Amortisationszeit der Zuluftklappe 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 %)	79
Abbildung 34:	Steuerungsparameter der TATAREK-Steuerung in grafischer Darstellung [49]	82
Abbildung 35:	Vergleich der gasförmigen Emissionen der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder mit dem Naturzugschornstein	83
Abbildung 36:	Direkter Vergleich der CO-Emissionen und Abgastemperaturen des vierten Abbrands bei manuellem Betrieb mit dem vierten Abbrand bei Verwendung einer Ofensteuerung nach Optimierung der Steuerungsparameter (TATAREK 3)	84
Abbildung 37:	Direkter Vergleich der Org.-C-Emissionen des vierten Abbrands bei manuellem Betrieb mit einem vierten Abbrand bei Verwendung einer Ofensteuerung nach Optimierung der Steuerungsparameter (TATAREK 3)	85
Abbildung 38:	Mittlere Abbranddauer der verschiedenen Steuerungen und Zugbegrenzer im Vergleich	86
Abbildung 39:	Vergleich der Gesamtstaubemissionen (PM) der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder Naturzugschornstein	87
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 4.6)	88
Abbildung 41:	Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anzahl an Tagen mit Heizbetrieb pro Jahr, berechnet am Beispiel der Schmid SMR Verbrennungsluftsteuerung	90
Abbildung 42:	Gesiebte Rückstände nach 8 Abbränden bei manuellem Betrieb. Links: Partikel $\leq 3,15$ mm, rechts: Partikel $> 3,15$ mm	94
Abbildung 43:	Gesiebte Rückstände nach 8 Abbränden mit Steuerung Schmid SMR. Links: Partikel $\leq 3,15$ mm, rechts: Partikel $> 3,15$ mm	94
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	97
Abbildung 45:	Vergleich der CO-Emissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [43])	101

Abbildung 46: Vergleich der Org.-C-Emissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [43])..... 102

Abbildung 47: Vergleich der Gesamtstaubemissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [43])..... 103

Abbildung 48: Vergleich des Wirkungsgrads gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa (nach [43])..... 104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrade für Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe (Anforderungen bei der Typprüfung)	19
Tabelle 2:	Anzahl der in 2016 festgestellten Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe in der Bundesrepublik Deutschland, nach Alter sortiert [47].....	21
Tabelle 3:	Übergangsfristen für bestehende Einzelraumfeuerungsanlagen nach 1. BImSchV [5].....	22
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	50
Tabelle 7:	Ergebnisse des Spülversuchs mit den Schaumkeramik-Paaren nach Versuchsdurchführung.....	52
Tabelle 8:	Messzeiträume der untersuchten Kaminöfen bei der jeweiligen Luftklappeneinstellung	70
Tabelle 9:	Mittelwerte aus den Messdaten zu den kalten Stillstandverlusten sowie mittlere berechnete monatliche Verluste (n. a. = nicht analysiert)	71
Tabelle 10:	Ergebnisse der Messungen während des Abkühlvorgangs nach dem Ofenbetrieb bei geöffneter Luftklappe (letzte eingestellte Position) (Kaminöfen A).....	74
Tabelle 11:	Ergebnisse der Messungen während des Abkühlvorgangs nach dem Ofenbetrieb bei geschlossener Luftklappe (Kaminöfen A)	75
Tabelle 12:	Vergleich der Wirkungsgrade und Verluste (jeweils in %) der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder am Naturzugschornstein.....	89
Tabelle 13:	Mittlere Ergebnisse der Elementaranalyse und der Heizwertberechnung nach Gaur et al. sowie der Heizwertbestimmung nach DIN EN ISO 18125 (n. n. = nicht nachweisbar).....	96
Tabelle 14:	Tabellarischer Vergleich der Asche und Holzkohlemengen nach den Versuchen sowie der Glühverluste und der eingesetzten Brennstoffmenge	98
Tabelle 15:	Tabellarischer Vergleich der Asche und Holzkohlemengen nach den Versuchen sowie der Glühverluste und der eingesetzten Brennstoffmenge (Fortsetzung)	99

1 Einleitung

Aktuell stellt die Holzverbrennung in Kleinfeuerungsanlagen die am meisten verbreitete Bioenergieanwendung in der Bundesrepublik Deutschland dar. Begünstigt durch EU-weite (z. B. Finanzierung diverser Forschungsprojekte) und nationale Maßnahmen (z. B. KfW, BAFA und „10.000 Häuser“-Programm) zur Förderung von Biomasse zur Energiebereitstellung ist die erwartete EU-weite Zunahme häuslicher 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 Potenzial an jährlich zusätzlich installierten Öfen (Scheitholz und Pellets) in der EU bei rund 2.200.000 Einheiten/Jahr [24].

Das zusätzliche Potenzial an erneuerbarer Wärme kann 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. Diese Emissionen gilt es zu reduzieren. Eine Möglichkeit stellen dabei primärseitige, technische Innovationen dar. Bereits in dem ERA-NET-Projekt „FutureBioTec“ (4th joint call in 2009 on clean biomass combustion) konnte gezeigt werden, dass mit der Entwicklung fortschrittlicherer Verbrennungskonzepte durch moderne Simulationstools (z. B. CFD – computational fluid dynamics) eine signifikante Minderung der Emissionen verglichen mit Öfen nach dem damaligen Stand der Technik möglich ist (60 % Reduktion für CO, 85 % für Org.-C und 55 % für Gesamtstaub) [39].

Das in diesem Bericht wiedergegebene ERA-NET-Projekt „Wood Stoves 2020“ knüpft direkt an die Ergebnisse des Projekts „FutureBioTec“ an und zielt auf die Entwicklung innovativer Maßnahmen und Technologien ab, um die Emissionen von Kaminöfen weiter zu reduzieren, den Wirkungsgrad der Anlagen zu steigern und das Anwendungsgebiet von der ausschließlichen Einzelraumfeuerstätte zur Zentralheizung auszuweiten. Letzteres könnte vor allem für zukünftige Anwendungen innovativer Kaminöfen in Niedrigenergiehäusern relevant sein.

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 sollen. Die Verbrennung findet in der Hauptbrennkammer (5) statt. Der Brennstoff wird dabei manuell durch den Nutzer nachgelegt.

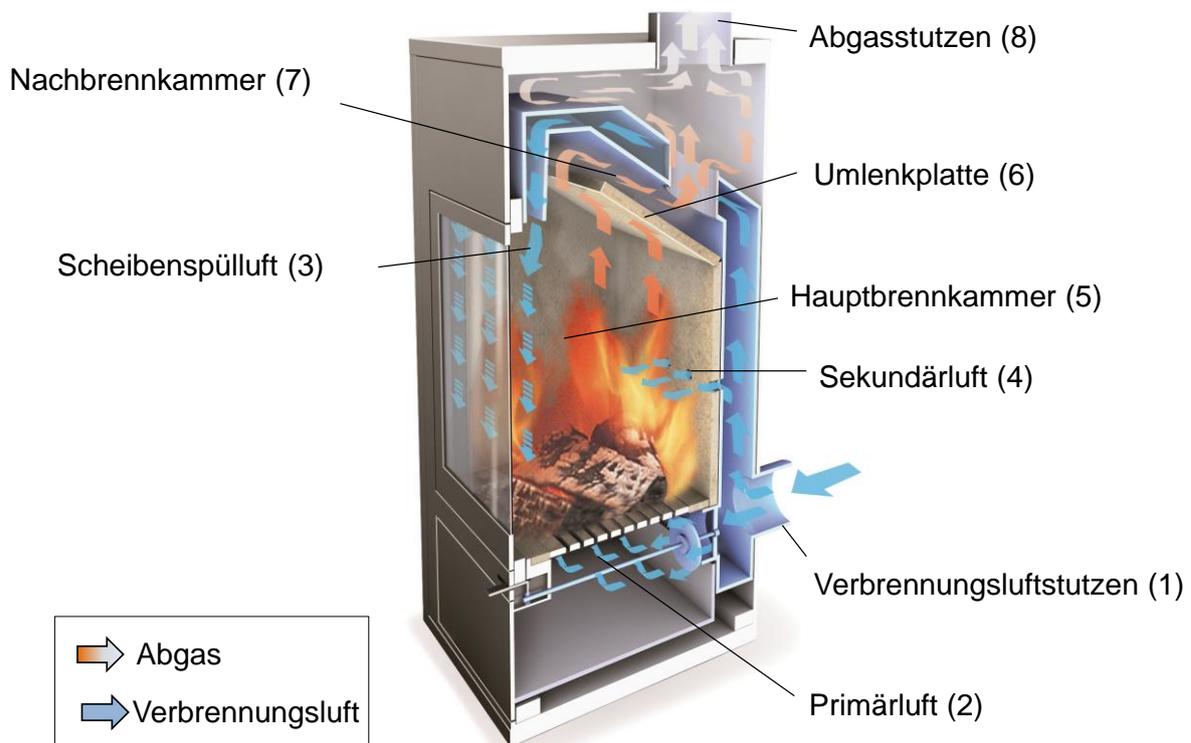


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Kaminofens nach Stand der Technik [30]

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 zum 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 in der Hauptbrennkammer erzeugte Wärme 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 Sauerstoff 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 konzipierte Konvektionskanäle abgegeben.

2.2 Rechtlicher Hintergrund

Die Zulassung und Nutzung von Kaminöfen ist in der Bundesrepublik Deutschland über die 1. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (1. BImSchV) geregelt. Seit dem 31.12.2014 müssen neu installierte Einzelraumfeuerungen den

Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV einhalten (Tabelle 1). Für Kaminöfen bzw. Raumheizer ist dieser 1,25 g/Nm³ für CO und 0,04 g/Nm³ für Staub.

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrade für Einzelraumfeuerungsanlagen 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 der Verordnung
		CO (g/m ³)	Staub (g/m ³)	CO (g/m ³)	Staub (g/m ³)	Mindestwirkungsgrad (%)
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
Speichereinzelfeuerstätten	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
Kachelofeneinsätze mit Flachfeuerung	DIN EN 13229/A1	2,0	0,075	1,25	0,04	80
Kachelofeneinsätze mit Füllfeuerung	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 offener 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 gültigen DIN EN 13240 und DIN CEN/TS 15883 bieten nach Recherchen, die in dem EU-Projekt „beReal“ durchgeführt wurden, deutlichen Interpretationsspielraum hinsichtlich der Durchführung von Emissionsmessungen und Auswertungen. So wird beispielsweise die Messung der partikelförmigen Emissionen in Deutschland auf Typenprüfständen häufig mit dem Partikelmessgerät Wöhler SM 96 durchgeführt, welches in Messungen an Kaminöfen im Rahmen des EU-Projekts „beReal“ deutliche Abweichungen von -10 bis -33 % zum angewendeten Referenzverfahren nach VDI 2066 [51] 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 [32]. Dieser wird somit 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 sein müssen, noch ob es dieselben Abbrände für die Berechnung des Wirkungsgrads und der CO-Emissionen sein müssen. Auch das Anzünden und das Aufheizen des Kaminofens werden bei der Typenprüfung nicht mitgemessen. 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 (vgl. auch Abschnitt 2.4).

2.3 Anzahl an Einzelraumfeuerungen in der Bundesrepublik Deutschland

Aktuell wird in der Bundesrepublik Deutschland von ca. 11,7 Mio. Einzelraumfeuerungen ausgegangen [47]. Hierunter fallen größtenteils Kaminöfen. Tabelle 2 zeigt die Anzahl der 2016 durch den Bundesverband des Schornsteinfeger-Handwerks festgestellten Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland nach dem Alter auf dem Typenschild sortiert. Aus diesen Zahlen sowie den in der 1. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (1. BImSchV) [5] festgelegten Fristen (Tabelle 3, siehe auch Abschnitt 2.2) 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. Dem Betreiber der Anlage bleiben nach Ablauf der in Tabelle 3 angegebenen Übergangsfristen drei Möglichkeiten:

- Austausch der Einzelraumfeuerung gegen neue Anlage, die den Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV 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. BImSchV [5] durch eine/-n Schornsteinfeger/-in nach, dass der Grenzwert der 1. BImSchV für Anlagen, die vor dem 22. März 2010 errichtet wurden, eingehalten wird (Gesamtstaub $\leq 0,15 \text{ g/Nm}^3$ und CO $\leq 4 \text{ g/Nm}^3$), oder er sorgt dafür, dass durch Nachrüstung einer Einrichtung zur Reduzierung der Staubemissionen nach dem Stand der Technik der Grenzwert eingehalten wird, darf die Anlage weiter betrieben werden.
- Die Anlage wird nach Ablauf der Übergangsfrist außer Betrieb genommen.

Tabelle 2: Anzahl der in 2016 festgestellten Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe in der Bundesrepublik Deutschland, nach Alter sortiert [47]

Baujahr/Datum auf dem Typenschild der Anlage	Anzahl	gerundet	relativer Anteil (%)
vor 01.01.1950	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 21.03.2010	4.854.837	4.850.000	41,5
ab 22.03.2010	2.353.086	2.350.000	20,1
Gesamt	11.685.613	11.680.000	100,0

Tabelle 3: Übergangsfristen für bestehende Einzelraumfeuerungsanlagen nach 1. BImSchV [5]

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

Für Kaminöfen ist aufgrund der im Vergleich zu z. B. Kachelöfen eher geringen Anschaffungskosten i. d. R. mit einem Austausch der Anlage als mit der Nachrüstung von staubmindernden Maßnahmen (z. B. Partikelabscheider) zu rechnen. Vor allem bei den bis 2020 und den bis 2024 insgesamt ca. 6,3 Mio. auszutauschenden oder nachzurüstenden Anlagen (ca. 53,8 % der derzeit installierten Anlagen) besteht ein sehr großes Emissionsminderungspotenzial. Das gilt allerdings nur, wenn die alten Anlagen auch gegen im Praxisbetrieb tatsächlich emissionsarme Neuanlagen getauscht werden [44].

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 % Bezugsauerstoff) sowie einen Mindestwirkungsgrad von 73 % ein. Die Typenprüfung spiegelt aber nicht unbedingt den realen Praxisbetrieb wider. In vorausgegangenen bzw. parallel laufenden Projekten (EU-Projekt „beReal“ und „BMU-Feinstaub“ [29; 43; 45; 52]) konnte gezeigt werden, dass bedingt durch das Betreiberverhalten (z. B. ungünstige Lufteinstellungen, zu hohe Brennraumbeladung, falsches Anzünden) sowie die örtlichen Gegebenheiten (z. B. Schornsteinzug) und die Brennstoffqualität (zu feuchtes Holz oder ungeeignete Aufbereitungsform, z. B. Rundlinge) die Emissionen von Scheitholzkaminöfen in der Praxis die Werte der Typenprüfungen sowie die Grenzwerte der 1. BImSchV deutlich übersteigen können. Auch die Wirkungsgrade lagen bei praxisnahen Messungen teilweise deutlich unter den geforderten 73 %. Als Folge wurden neuartige Prüfmethode für die Messung realer Emissionen an Kaminöfen (EU-Projekt „beReal“ mit Anzündphase sowie Nenn- und Teillastbetrieb [44] [45]) sowie zahlreiche Beratungsunterlagen für den richtigen Betrieb eines Kaminofens und für den richtigen Umgang mit dem Brennstoff (Lagerung, Scheitholzgröße etc.) erstellt [30]. 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 eigens erstellt werden muss, empfohlen [44].

Weiteres Optimierungspotenzial liegt in primär- und sekundärseitigen technischen Verbesserungen der Anlagen selbst. So konnte bereits im ERA-NET-Projekt „FutureBioTec“ gezeigt werden, dass mit fortschrittlicheren Verbrennungskonzepten und unter Zuhilfenahme von Simulationstools (CFD) eine Minderung der Emissionen von 60 % für CO, 85 % für Org.-C und 55 % für Staub verglichen mit Öfen nach dem damaligen Stand der Technik möglich ist [39].

Tendenziell wirkt eine Erhöhung des Wirkungsgrads bzw. Systemwirkungsgrads (Ofen und Schornstein) auch senkend auf den Ausstoß von Schadstoffen hin, da zur Bereitstellung derselben Wärmemenge weniger Primärenergie eingesetzt und damit im Vergleich weniger Emissionen freigesetzt werden [34; 54]. 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 und 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 (open-loop 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).

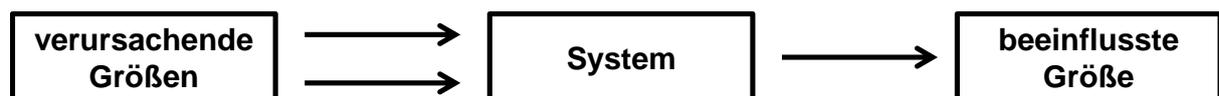


Abbildung 2: Wirkungsplan eines Systems mit offenem Wirkungsweg (Steuerkette)

Im Gegensatz dazu handelt es sich bei „einer ‚Regelung‘ um einen Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (d. h. 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).

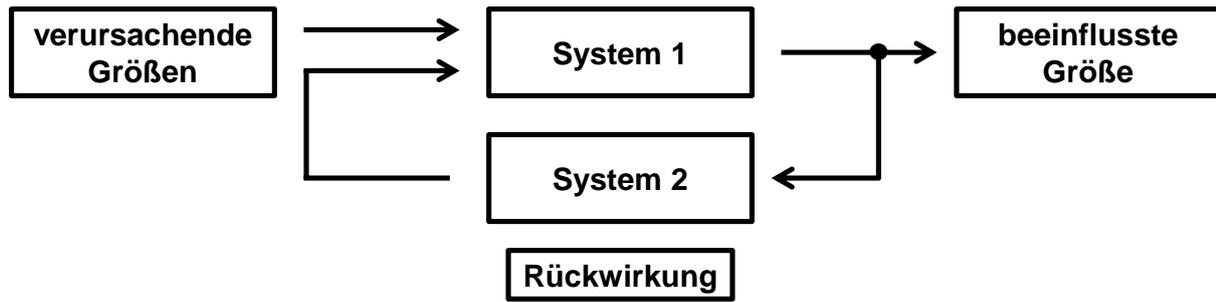


Abbildung 3: Wirkungsplan eines Systems mit geschlossenem Wirkungsweg (Regelkreis)

Beispielsweise wäre ein Ofenbetrieb, bei dem der Abbrandzustand auf Basis der Abgas-temperatur 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 Sollwerts überprüft und durch Klappenstellung nachjustiert werden könnte, handelte es sich um eine Regelung.

3 Zielsetzung und Aufbau des Projekts

Ziel des Projekts „Wood Stoves 2020“, das diesem Bericht zugrunde liegt, war es, geeignete Konzepte, Technologien und Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen von Scheitholz-Kaminöfen im Praxisbetrieb um 50 bis 80 % sowie Steigerung des Wirkungsgrads auf über 90 % zu identifizieren. Unter der Annahme, dass in Zukunft alle neu installierten Kaminöfen in Europa mit diesen neuen Technologien ausgerüstet sind, könnte der Ausstoß an Staubemissionen aus Kaminöfen 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. Arbeiten und Ergebnisse, die vornehmlich außerhalb der Projektschwerpunkte des TFZ stattfanden, werden nicht in diesem Bericht, sondern in separaten Guidelines und Berichten der Verbundprojektpartner wiedergegeben. Entsprechende Verweise sind der nachfolgenden Kurzdarstellung beigelegt und stehen auf der Projektseite unter <http://www.tfz.bayern.de/en/162907/index.php> zum kostenlosen Download bereit.

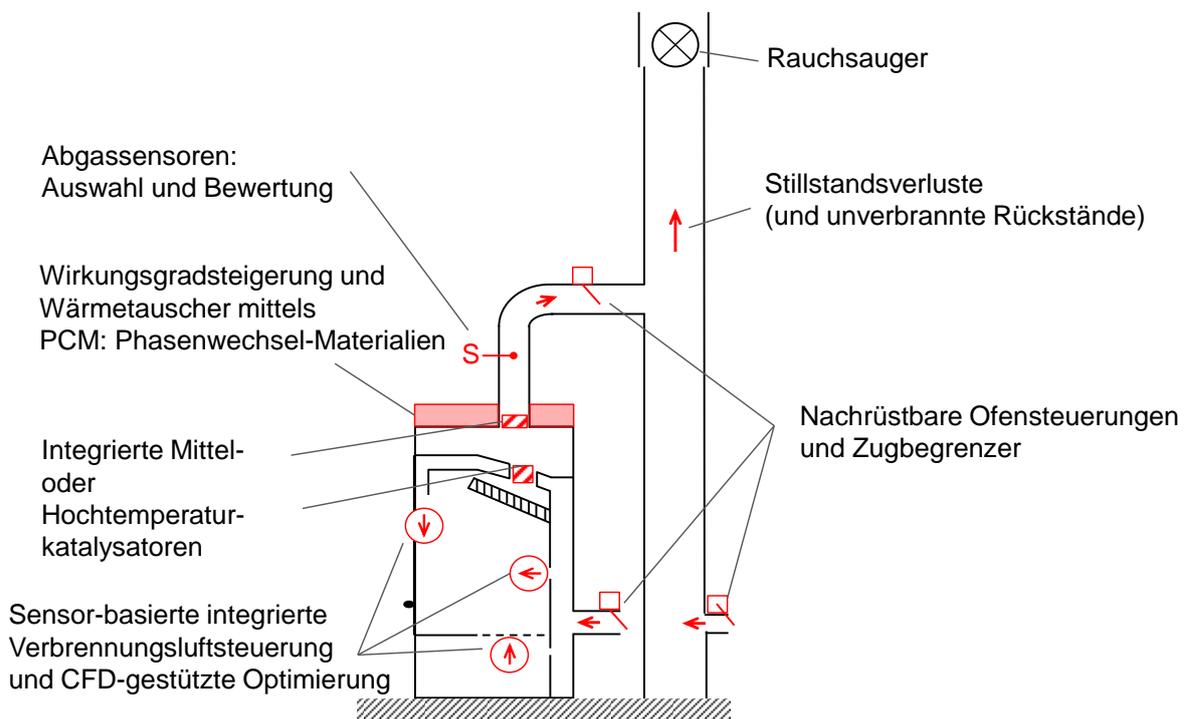


Abbildung 4: Maßnahmen bzw. Ansatzpunkte, die im Rahmen des Projekts „Wood Stove 2020“ untersucht bzw. entwickelt wurden

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 Langzeitversuch unter Realbedingungen getestet. Die Arbeiten erfolgten über die Projektpartner RISE (Research Institutes of Sweden AB) und BIOS (BIO-ENERGIESYSTEME GmbH). Nähere Informationen können dem gesonderten Bericht der Projektpartner entnommen werden [48].

Sensor-basierte integrierte Verbrennungsluftsteuerungen

Ziel einer integrierten Verbrennungsluftsteuerung ist es, die Verbrennungsluftmassenströme während eines Abbrands immer optimal einzustellen. Hierdurch können vor allem die gasförmigen Emissionen (CO und Org.-C), unter Umständen aber auch die Emissionen unverbrannter Partikel (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 Guidelines [42] 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 Final Report [36]).

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 schrittweisen Optimierung von Öfen an Praxisanlagen, vorzuziehen. Die CFD-gestützte Optimierung wurde maßgeblich durch den Projektpartner BIOS durchgeführt. Einzelheiten hierzu finden sich in den erstellten Guidelines für optimierte Ofenkonzepte [40].

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 sogenanntes Phasenwechselmaterial (PCM) eingesetzt, d. h. ein Salz, das 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 Guidelines [41] zu PCM und Final Report [36]).

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 nachrüstbare Katalysatoren getestet. Die Arbeiten fanden u. a. am TFZ statt und werden in diesem Bericht wiedergegeben (siehe Abschnitt 5). 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 [37] zusammengefasst und auch in den Guidelines für optimierte Ofenkonzepte [40] zu finden (siehe auch Final Report [36]).

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 Final Reports [36] veröffentlicht. Hierfür war der Projektpartner RISE maßgeblich verantwortlich.

Stillstandverluste (und unverbrannte Rückstände)

Eine weitere Möglichkeit, den Nutzungsgrad von Kaminöfen zu steigern, ist es, die sogenannten Stillstandverluste 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 6 sowie im Final Report [36] [35] dargestellt. Außerdem wurden die Verbrennungsrückstände durch das TFZ untersucht und hinsichtlich ihres Gehalts an Unverbranntem und dessen Energiegehalt bewertet (siehe Abschnitt 8).

Nachrüstbare Ofensteuerungen und Zugbegrenzer

Zusätzlich zu der Möglichkeit, neue Kaminöfen mit automatischen Verbrennungsluftsteuerungen auszustatten, können solche Steuerungen in einfacherer Form (ohne Unterteilung der Luftströme) bei bestehenden Öfen nachgerüstet werden. Die Wirkung solcher

nachrüstbaren Steuerungen hinsichtlich der Emissionen und des Wirkungsgrads wurde anhand drei auf dem Markt verfügbarer Modelle 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 7 dieses Berichts wiedergegeben. Allgemeine Hinweise zu Entwicklung und Betrieb nachrüstbarer Ofensteuerungen können den Guidelines über automatische Ofensteuerungen [42] entnommen werden.

Bei den im vorliegenden Projekt untersuchten nachrüstbaren Ofensteuerungen handelt es sich per Definition um „Steuerungen“ (vgl. Abschnitt 2.4). 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.

In den folgenden Kapiteln wird auf die Aufgabenschwerpunkte des am Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) bearbeiteten Projektteils (siehe Kapitel 4–9) eingegangen.

- Erarbeiten einer abgestimmten Prüfmethode für optimierte Ofenkonzepte und Bauteile zur Optimierung von Öfen (Abschnitt 4.6)
- Bewertung des Langzeitverhaltens von Schaumkeramikfiltern in Kaminöfen und deren Ersatz durch Katalysatoren (Abschnitt 5)
- Quantifizierung von Stillstandverlusten über den Schornstein sowie Bewertung von Minderungsmaßnahmen an Öfen (Abschnitt 6)
- Test und Bewertung mehrerer nachrüstbarer Ofensteuerungen hinsichtlich ihrer Wirkung auf Emissionen und Wirkungsgrad von Kaminöfen (Abschnitt 7)
- Untersuchung der unverbrannten Rückstände aus Kaminöfen hinsichtlich ihres Energieinhalts (Abschnitt 8)
- Quantifizierung des Einflusses von Schornsteinzug auf Wirkungsgrad und Emissionen von Kaminöfen sowie Prüfung und Bewertung moderner Zugbegrenzer (Abschnitt 9)

4 Material und Methoden

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Aufgabenschwerpunkten des Projekts „Wood Stove 2020“, die am Technologie und Förderzentrum untersucht wurden. Eine Zusammenfassung der gesamten Projektergebnisse aller internationalen Projektpartner findet sich im Final Report [36].

4.1 Beschreibung der verwendeten Feuerungen

Bei der für alle Feuerungsversuche (Abschnitt 5 bis 9) 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 Stillstandverluste im kalten Zustand (siehe Abschnitt 6) 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.

Tabelle 4: Technische Daten der verwendeten Kaminöfen

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

4.2 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 geregelter Schornsteinzug durchgeführt wurden, verwendet (siehe Abschnitte 5 und 7). Aufbau der Messstrecke und Anordnung der Messstellen erfolgten in Anlehnung an die gültige Norm zur Typenprüfung von Kaminöfen DIN EN 13240 [12].

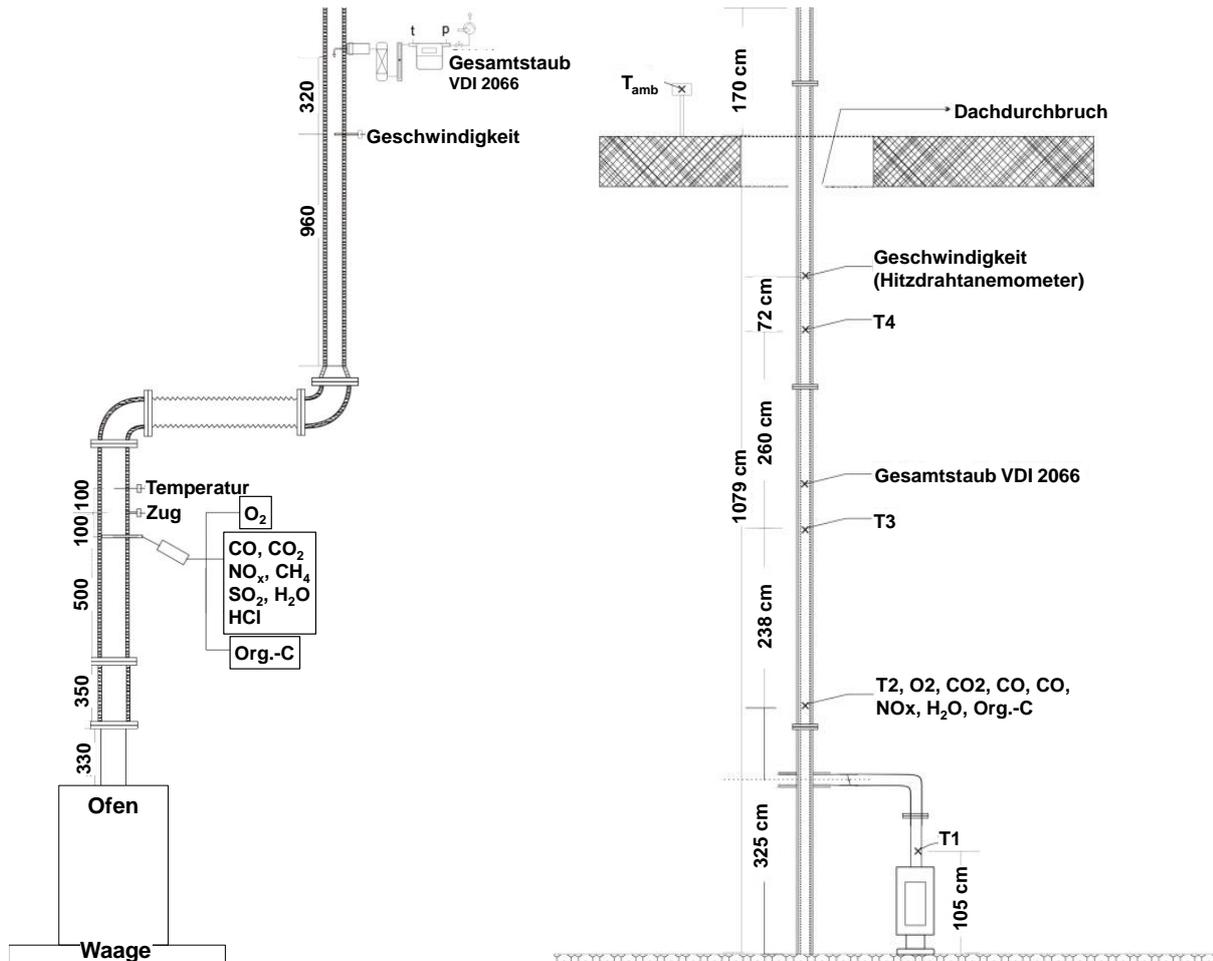


Abbildung 5: Prüfsandaufbau und Anordnung der Messstellen für die Kaminofenmessungen mit geregelterm Zug (links) und mit Naturzugschornstein (rechts)

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 4.6). 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-Gasanalytoren (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 geregelterm Schornsteinzug (12 Pa) konnte die Strömungsgeschwindigkeit mittels eines Flügelradanemometers (Höntzsch GmbH Flügelrad Strö-

mungssensor ZS25/25-ZG4) in einer Verjüngung der Messstrecke (siehe Abbildung 5 links) ausreichend genau bestimmt werden. Zur Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit bzw. des Abgasmassenstroms im Naturzugschornstein, vor allem während der Abkühlphasen (Bestimmung der Stillstandverluste, siehe Abschnitt 6) 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.

4.3 Bestimmung von Wassergehalt, Glühverlust, Aschegehalt und Elementaranalyse

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

Die inhaltsstofflichen Analysen der gemahlene 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 (Cl) 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].

4.4 Eingesetzte Filter-, Dummy- und Katalysatorelemente

Um zu überprüfen, ob die Betriebsstunden eines Schaumkeramikfilters einen Einfluss auf die Emissionen haben (Abschnitt 5), wurden drei Paar Filterelemente (Abbildung 6) mit einer unterschiedlichen Anzahl bereits absolvierter Abbrände (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 [46]. Analog zum Linienschnittverfahren werden dabei die Grenzen der Poren entlang eines Schnitts gezählt, d. h. je kleiner der Wert für die Porosität, desto offener ist der Werkstoff.

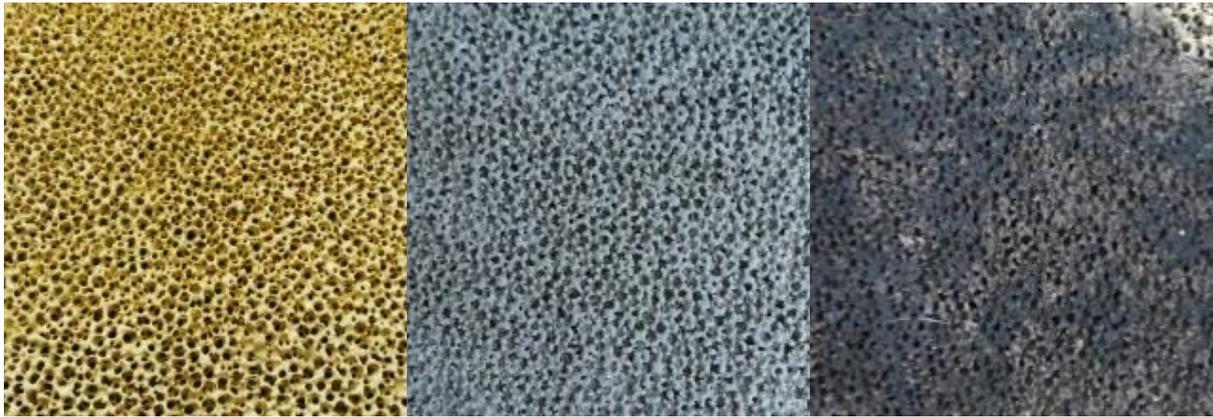


Abbildung 6: Geprüfte Schaumkeramik-Elemente: unbenutzt (links), 200 Abbrände (Mitte), 550 Abbrände (rechts)

Neben den drei Filterpaaren wurde eine katalytisch beschichtete Schaumkeramik der Firma Linder Katalysatoren GmbH verwendet. Das Trägermaterial besteht aus einer offenenporigen (30 ppi) Schaumkeramik ($\text{SiC} - \text{SiO}_2 + 3\text{C} \rightarrow \text{SiC} + 2\text{CO}$ und Al_2O_3). Die Aktivierungstemperatur des Katalysators liegt laut Hersteller bei $> 100\text{ }^\circ\text{C}$, die Hitzebeständigkeit bei $> 1.700\text{ }^\circ\text{C}$. Der Hersteller gibt die katalytische Beschichtung als eine Mischung aus Platin, Palladium und Rhodium an.

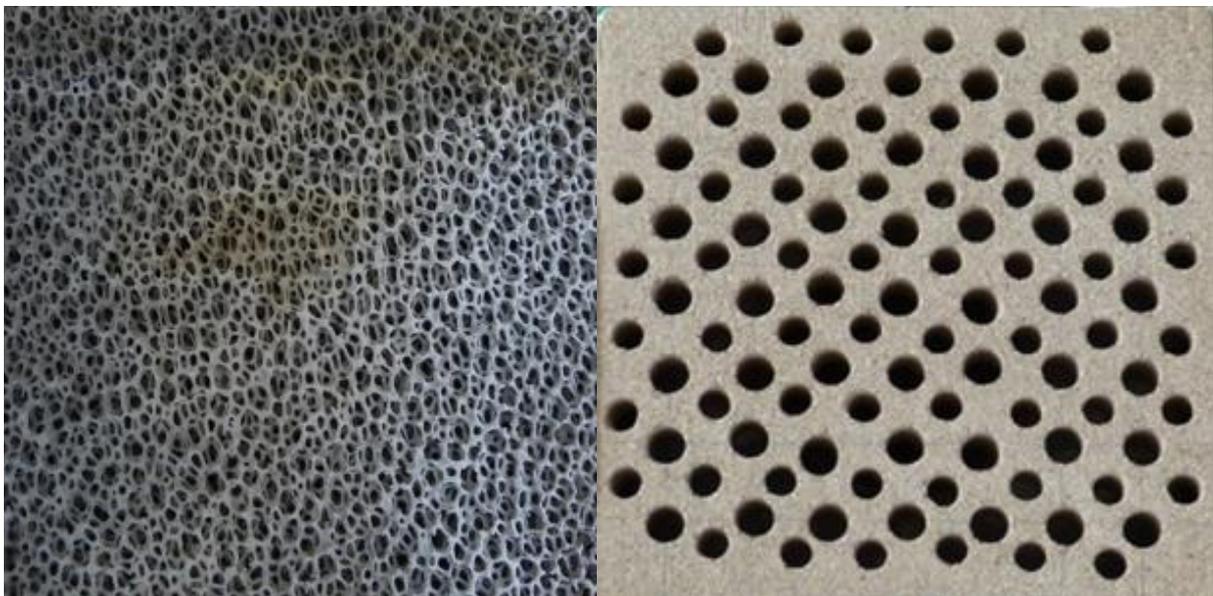


Abbildung 7: Katalytisch beschichtete Schaumkeramik (links), „Dummy“ Element für vergleichbare Strömungsbedingungen (Druckverluste) im Kaminofen (rechts)

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. Ka-

talysator 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 primärseitiger Effekte (z. B. durch Erhöhung des Druckverlusts, Änderung der Strömung etc.) zu einer Über- bzw. Unterbewertung der Wirkung des katalytischen oder filternden Effekts auf den Schadstoffausstoß kommt. Für die Herstellung des „Dummy“-Elements wurde extra ein kleiner Prüfaufbau konstruiert, um die bestehenden Filterelemente hinsichtlich ihres Druckverlusts 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 μm .

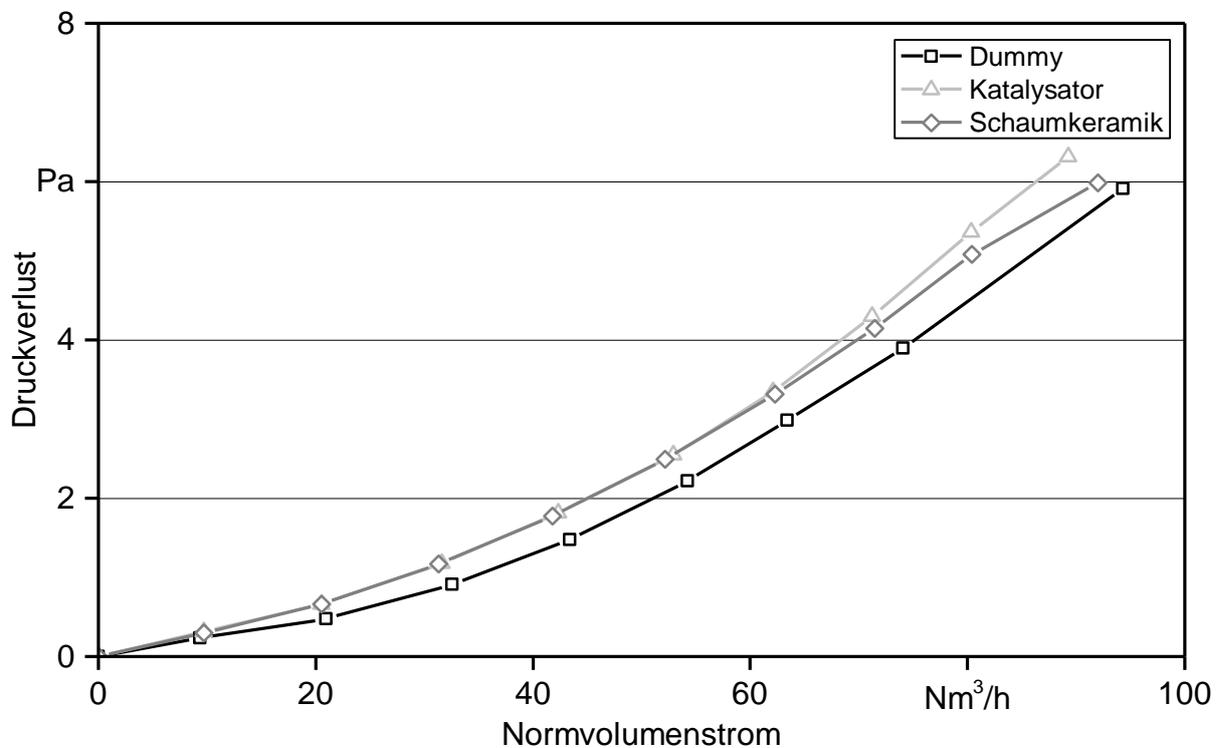


Abbildung 8: Überprüfung der Übereinstimmung der Druckverluste über den Normvolumenstrom der drei eingesetzten Elemente

4.5 Eingesetzte Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbegrenzer

Innerhalb des Projekts wurden insgesamt drei nachrüstbare Ofensteuerungen, ein elektronischer sowie ein mechanischer Zugbegrenzer untersucht. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht der einzelnen Steuerungen bzw. Zugbegrenzer und deren wichtigste Eigenschaften.

Tabelle 5: Übersicht der untersuchten Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbegrenzer

Testbedingung	Geregelter Zug			Naturzug	
Typ	TATAREKRT 8OS-G-TD	Schmid SMR	K+W Compact	ATEC Florian	K+W Zugbegrenzer
Funktionsprinzip	Thermoelement + elektronische Klappe	Thermoelement + elektronische Klappe	Thermoelement + elektronische Klappe	Thermoelement + Druck und Geschwindigkeitssensor + elektronische Klappe + Lüfter	mechanische Klappe
Einbauort	Zuluftstutzen	Zuluftstutzen	Zuluftstutzen	zwischen Schornstein und Abgasrohr	zwischen Schornstein und Abgasrohr oder an der Schornsteinsohle
Freier Restquerschnitt	6,2 cm ² bzw. 8 %	dicht schließend	9 cm ² bzw. 8 %	–	–
Ungefährer Endkundenpreis inkl. Zubehör	276 €	1.100 €	1.070 € (ohne Display)	300 €	300 €

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

Um neuartige Techniken und Geräte realitätsnah und reproduzierbar zu bewerten und innerhalb des Projekts zwischen den Projektpartnern vergleichbare Ergebnisse zu produzieren, wurde eine realitätsnahe, sich am tatsächlichen Praxisbetrieb orientierende Prüfmethode entwickelt und zwischen den Projektpartnern abgestimmt. Die Prüfmethode 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 eines Thermoelements oder eines Ansaug-Pyrometers durchgeführt werden. Bei Verwendung eines Ansaug-Pyrometers ist eine Geschwindigkeit im freien Querschnitt (5 ± 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-Projekts „beReal“ [44], 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 drei 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-% (± 4 m-%) liegen (Probenahme und Bestimmung ohne Verzögerung zum Feuerungsversuch).

Eine Prüfung besteht aus acht aufeinanderfolgenden Brennstoffauflagen (eine Anzündauflage, vier Volllastauflagen und drei Teillastauflagen). Sie beginnt mit dem Anzünden des Ofens im kalten Zustand und endet nach der Abkühlphase. Der Zeitpunkt des Nachlegens ist erreicht, sobald der CO_2 -Gehalt im Abgas entweder bei < 4 % (absolut) oder < 25 % (relativ) des maximalen CO_2 -Gehalts ($\text{CO}_{2\text{max}}$) des jeweiligen Abbrands liegt. Wenn der maximale CO_2 -Gehalt des Abbrands den Wert von 12 % (absolut) nicht überschreitet, erfolgt das Nachlegen des Brennstoffs erst bei 3 % CO_2 -Gehalt im Abgas (absolut), d. h. wenn die Flammen bereits erloschen sind. Abbildung 9 zeigt eine schematische Darstellung eines Prüfzyklus inklusive aller Nachlegekriterien. Die Weise, wie der Brennraum mit Brennstoff zu befüllen ist, sowie die Brennstoffmenge für Voll- und Teillastbetrieb sind entweder vonseiten des Herstellers oder des Forschungspartners in einem „Quick-User-Guide“ leicht nachvollziehbar zu beschreiben (vgl. Projekt „beReal“ [44]).

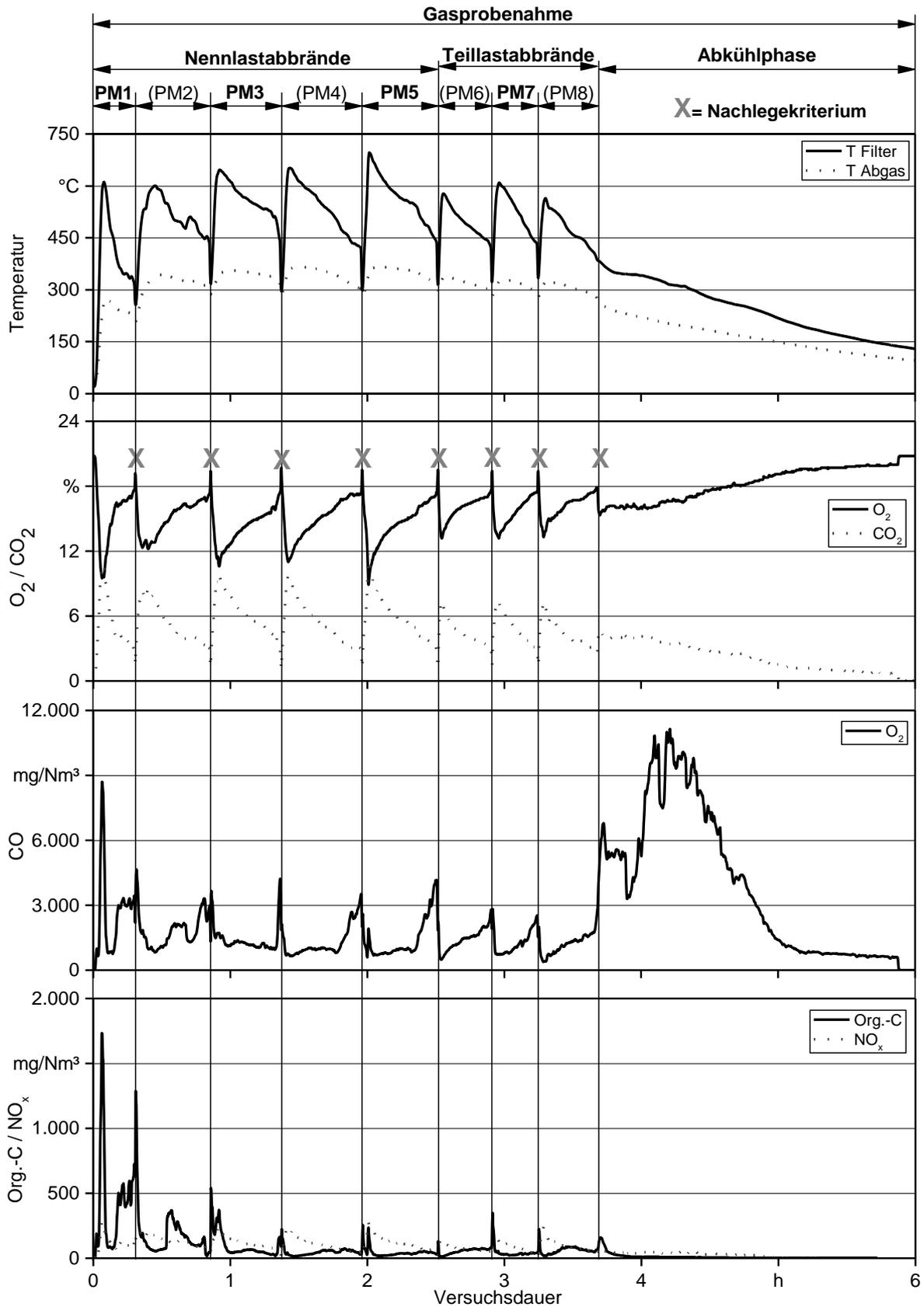


Abbildung 9: Schematischer Ablauf eines Prüfzyklus (PM: Gesamtstaubmessung; (PM): optionale Gesamtstaubmessung)

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 fünf Volllastabbrände kommen. Hierfür beinhalten manche Steuerungskonzepte einen sogenannten Holzkohleabbrand, in dem 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 Holzkohleabbrands anzeigen (z. B. über das Display). Während des Holzkohleabbrands 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 ($\pm 2 \text{ Pa}$) konstant gehalten.

Die Abkühlphase startet, wenn am Ende des achten Abbrands das o. g. Nachlegekriterium erfüllt ist oder die Steuerung zum Nachlegen auffordert bzw. am Ende des Holzkohleabbrands, wenn dieser nach dem achten 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 achten Abbrands (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 schließender/n Verbrennungsluftklappe/n).

Quick-User-Guide

Die Feuerstätte wird nach dem „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 für den optimalen Betrieb der Feuerung in Nenn- und Teillast relevanten Angaben:

- 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 und Anzünden

- Reinigen und öffnen Sie den 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 und 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)
- **Luftstellungen 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 erloschen oder keine Flammen mehr sichtbar sind und genug Glut vorhanden ist.
- Nach dem ersten Abbrand (Abb. 6):
 - Scheitholz: **3 Scheite**, je ca. **0,7 kg**, Gesamtgewicht ca. **2,1 kg**
- Teillastbetrieb (Abb. 7):
 - Scheitholz: **2 Scheite**, Gesamtgewicht ca. **1,0 kg**
- Die Platzierung der Scheite nach Abb. 6 – nur parallel zur Feuerraumtür
- **Luftstellungen Abbrand 2:**
 - Beipass: geschlossen **“Z”** (Abb. 8)
 - Primär- und Sekundärluft: ganz offen (Abb. 4 und 5)
- **Luftstellungen Nennlastbetrieb (nach 2. Abbrand):**
 - Beipass: geschlossen **“Z”** (Abb. 8)
 - Primärluft: ganz geschlossen **“min”** (Abb. 9)
 - Sekundärluft: 20% geschlossen (Abb. 10)
- **Luftstellungen Teillastbetrieb:**
 - Beipass: geschlossen **“Z”** (Abb. 8)
 - Primärluft: ganz geschlossen **“min”** (Abb. 9)
 - Sekundärluft: 40% geschlossen (Abb. 11)



3. Ende des Heizbetriebs

- Wenn die Flammen erloschen sind (Abb. 12):
 - **Schließen Sie die Luftklappen, um Wärmeverluste zu vermeiden**
 - Primärluft: ganz geschlossen **“min”** (Abb. 13)
 - Sekundärluft: ganz geschlossen **„min“** (Abb. 14)



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-Guides für den Kaminofen Hark 44 GT ECO-plus (erstellt vom TFZ im Rahmen des „beReal“-Projekts [44])

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 ($\pm 2 \text{ Pa}$) 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. CO_2 -Kriterium erreicht ist.

Um den Effekt der Steuerung oder Regelung im Vergleich zu dem gewöhnlichen Kaminofen bewerten zu können, ist eine Prüfung (drei Wiederholungen des Prüfzyklus von acht Abbränden) ohne Steuerung oder Regelung (Handbetrieb) durchzuführen (Nachlegezeitpunkt nach CO_2 -Kriterium).

Messung der gasförmigen Komponenten

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

- O_2 0–21 Vol.-%, $\pm 0,4$ Vol.-%,
- CO_2 0–20 Vol.-%, $\pm 0,4$ Vol.-%,
- CO 0–15.000 ppm, $\pm 10 \%$ (0–500 ppm, ± 10 ppm; 0–3000 ppm, ± 45 ppm),
- NO_x 0–500 ppm, $\pm 5 \%$,
- Org.-C 0–10.000 ppm, $\pm 5 \%$ 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 $\leq 10 \text{ s}$ sein.

Messung der Abgasgeschwindigkeit

Für die Messung der Abgasgeschwindigkeit sind geeignete Sensoren zu verwenden (Flügelradanemometer, Prandtl Staurohr oder Hitzdrahtanemometer). Der untere Messbereichsendwert sollte dabei $\leq 0,2 \text{ m/s}$ 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 der Abbrände 1, 3, 5 und 7 oder, wenn möglich, während aller Abbrände (erfordert zwei unabhängige Staubsonden). Die erste Staubbemessung 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 mit Quarzwolle gestopfter Filterhülsen mit nachgeschaltetem Quarzfaser-Planfilter. Durch eine solche Kombination kann in der Regel sichergestellt werden, dass ein kompletter Abbrand ohne Unterbrechung mit ei-

nem 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 Abgasstroms ausgerichtet sein. Während der Gesamtstaubmessung müssen entweder isokinetische oder über-isokinetische Bedingungen an der Düse sichergestellt werden.

Nach Beenden eines Prüfzyklus ist die Staubsonde (d. h. Düse, 90 Krümmer, Verbindungsrohr) mit Aceton zu spülen (siehe Abbildung 11). Dieser Vorgang sollte zwei- bis dreimal wiederholt werden. Die Suspension aus Rückständen und Aceton ist dann in einem explosionsgeschützten Abdampfschrank zu verdampfen. Das Spülgefäß durchläuft nach dem Abdampfen des Acetons dieselbe Nachbehandlung wie die beladenen Filter (1 h bei 180 °C und ≥ 8 h Abkühlen in einem Exsikkator). Die Spülrückstände werden dann gewogen und proportional zur Filterbeladung der Staubfilter (aus derselben Probenahmesonde) auf die einzelnen Messungen verteilt.

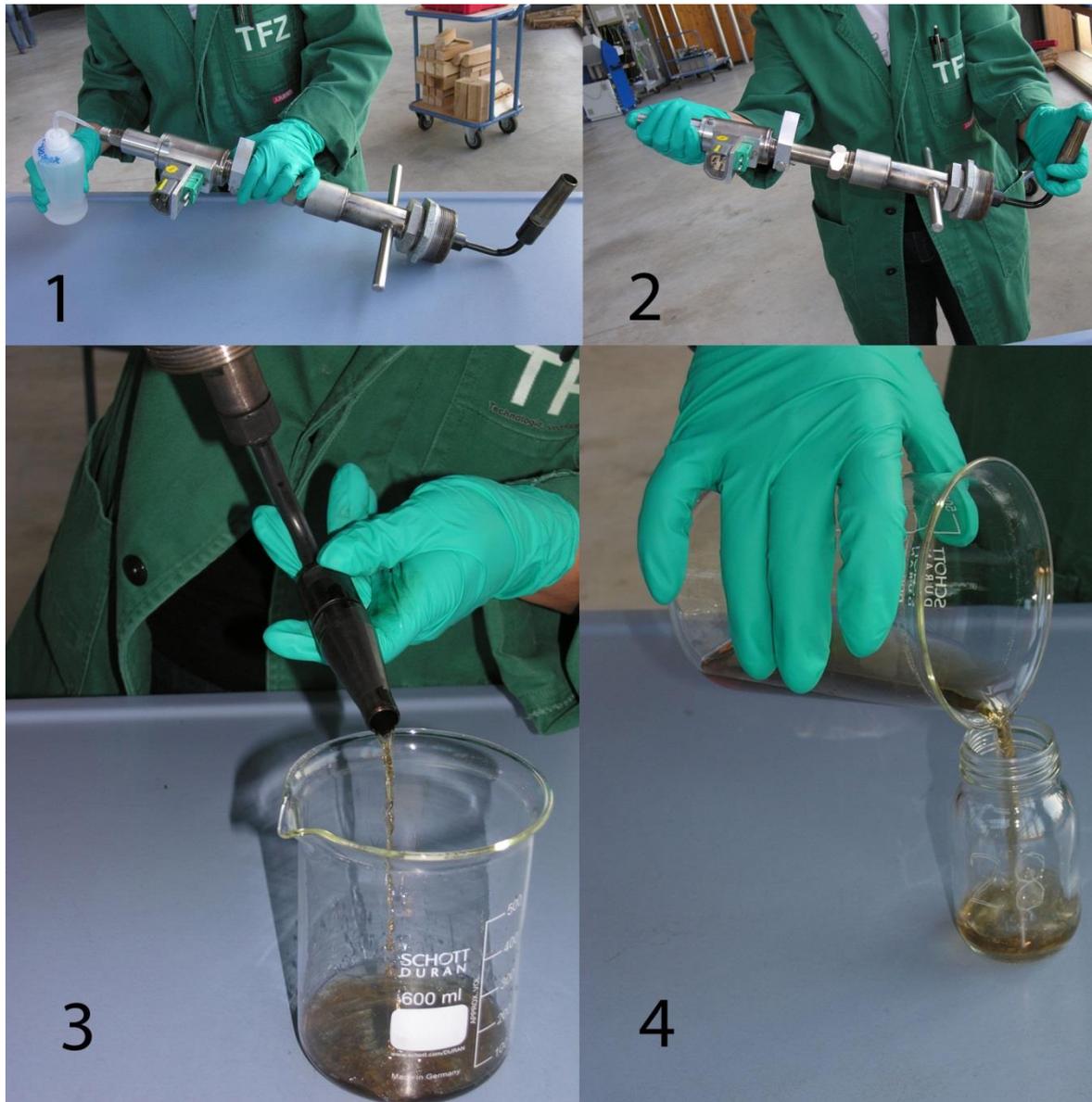


Abbildung 11: Spülen der Probennahmesonde nach der Staubmessung

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.

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

Wobei:

$E_{\frac{mg}{MJ}}$ = Emissionsmittelwert in mg/MJ,

E_{ppm} = Emissionskonzentration in ppm,

$\rho_{n,E}$ = Normdichte der Gaskomponente,

$\dot{V}_{n,t}$ = Volumenstrom normiert und trocken in Nm^3/h ,

Δt = Zeitintervall der Datenerfassung (≤ 10 s) 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

$H_{u,Hk}$ = Heizwert Holzkohle (trocknen) in MJ/kg ist.

Zum Vergleich mit Grenzwerten können die Emissionen in mg/Nm^3 bei 13 % O_2 durch folgenden nicht allgemeingültigen Faktor grob abgeschätzt werden [28]:

$$E_{\text{mg}/\text{Nm}^3} (13 \% \text{O}_2) = E_{\text{mg}/\text{MJ}} \times 1,576 \quad (4.2)$$

Wobei:

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

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

Die Berechnung des Wirkungsgrads 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 derzeit 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 in die Mittelwertbildung ein (neun 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 so lange 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 Berücksichtigung der Wärmeverluste während des Abkühlens und der Rückstände lässt sich wie folgt berechnen:

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

$$q_a = \frac{100 \times Q_a}{Hu_{Br,f}} \quad (4.4)$$

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

$$q_b = \frac{100 \times Q_b}{Hu_{Br,f}}, Q_b = 12644 \times CO \times \frac{C_{Br} - C_r}{0,536 \times (CO + CO_2) \times 100} \quad (4.6)$$

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

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

Wobei:

η = Wirkungsgrad in %,

q_a = thermische Verluste in %,

q_b = chemische Verluste in %,

q_c = Verluste aus unverbrannten Rückständen in %,

q_{cool} = Wärmeverluste während des Abkühlvorgangs in %,

Q_a = thermische Verluste bezogen auf Brennstoffenergie in kJ/kg,

Hu_{Br} = Heizwert des Brennstoffs (trocken) in kJ/kg,

$Hu_{Br,f}$ = Heizwert des Brennstoffs (feucht) in kJ/kg,

T_{Ag} = Temperatur des Abgases an Normmessstelle in °C,

T_{amb} = Umgebungstemperatur in °C,

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

C_{Br} = Kohlenstoffgehalt des Brennstoffs in m-%,

C_r = Kohlenstoffgehalt des Rückstands bezogen in m-% (Literaturwert möglich),

H_{Br} = Wasserstoffgehalt des Brennstoffs in m-%,

W_{Br} = Wassergehalt des Brennstoffs in m-%,

$C_{p,Agw}$ = spezifische Wärmekapazität des Abgases (feucht) in $\text{kJ}/(\text{K m}^3)$,

CO = Kohlenmonoxidgehalt im trockenen Abgas in %,

CO_2 = Kohlendioxidgehalt im trockenen Abgas in %,

Q_b = chemische Verluste bezogen auf Brennstoffenergie in kJ/kg ,

\dot{m}_{Luft} = mittlerer Luftmassenstrom innerhalb eines Messintervalls (≤ 10 s) in kg/s ,

Δt = Messintervall in s,

$c_{p,Luft}$ = spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur der Luft an der Normesstelle in $\text{kJ}/(\text{kg K})$,

ΔT = Temperaturdifferenz in K,

m_r = Masse des gesamten trockenen Rückstands (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“ (zwei Wochen Dauerbetrieb à fünf Werktagen) mit jedem Katalysator durchgeführt werden. Der Ofen inkl. Katalysator wurde während dieser zwei Wochen täglich an allen Werktagen betrieben. In den zwei Wochen wurden vier 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 zwei Wochen Betrieb untersucht.

Die einzelnen Prüfzyklen verliefen nach der bereits beschriebenen Methode. Die Untersuchung der Katalysatoren erfolgte entweder durch die Messung mittels geteilten Abgaskanals (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 (acht Abbrände) immer ein zusätzlicher Prüfzyklus mit Dummy (acht Abbrände) durchzuführen. Als Dummy (d. h. als Attrappe) war das gleiche Trägermaterial wie das des Katalysators, jedoch ohne katalytische Beschichtung, zu verwenden (d. h. vergleichbarer Druckverlust, siehe Abschnitt 4.4). 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.

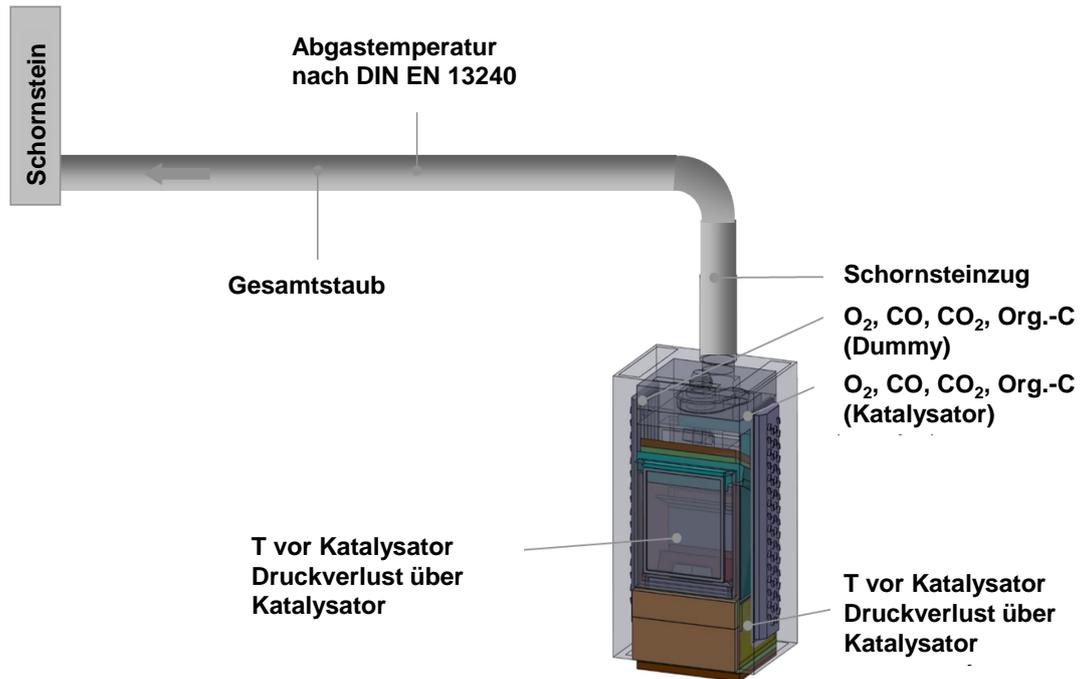


Abbildung 12: Exemplarischer Prüfstands Aufbau für die Katalysatormessung mit geteiltem Abgaskanal

Die Messungen der Abgastemperatur vor und nach dem Katalysator sowie des Druckverlusts über den Katalysator sollten 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 zweieinhalb Wochen (d. h. zehn Arbeitstage + zwei Tage) 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 zwei Wochen Betrieb (Tag 12).

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte 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.

4.7 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 $\leq 0,5$ war. Wenn in den folgenden Abschnitten also von Signifikanz gesprochen wird, sind stets diese Bedingungen erfüllt.

5 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. Für die Versuche wurde die in Abschnitt 4.2 beschriebene Messtechnik und der Prüfstands Aufbau nach Abbildung 5 (links) mit geregelter Schornsteinzug sowie die in Abschnitt 4.6 beschriebene Prüfmethode verwendet.

5.1 Vorversuche zur Luftströmung im Kaminofen

Um das Strömungsverhalten durch und um die Schaumkeramik zu untersuchen, wurden Vorversuche in Anlehnung an eine Veröffentlichung von AIGENBAUER et al. [1] 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 vier 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 Feuer-
raumverkleidung suchen.

Tabelle 6: Ergebnisse des Vorversuchs zur Strömung durch und um die Schaumkeramik

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

5.2 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 4.4, 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 Schaumkeramik-Paar mit 550 absolvierten Abbränden. CO, Org.-C und Gesamtstaubemissionen weisen keinen signifikanten Unterschied zwischen den Einzelwerten (drei 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 4.4).

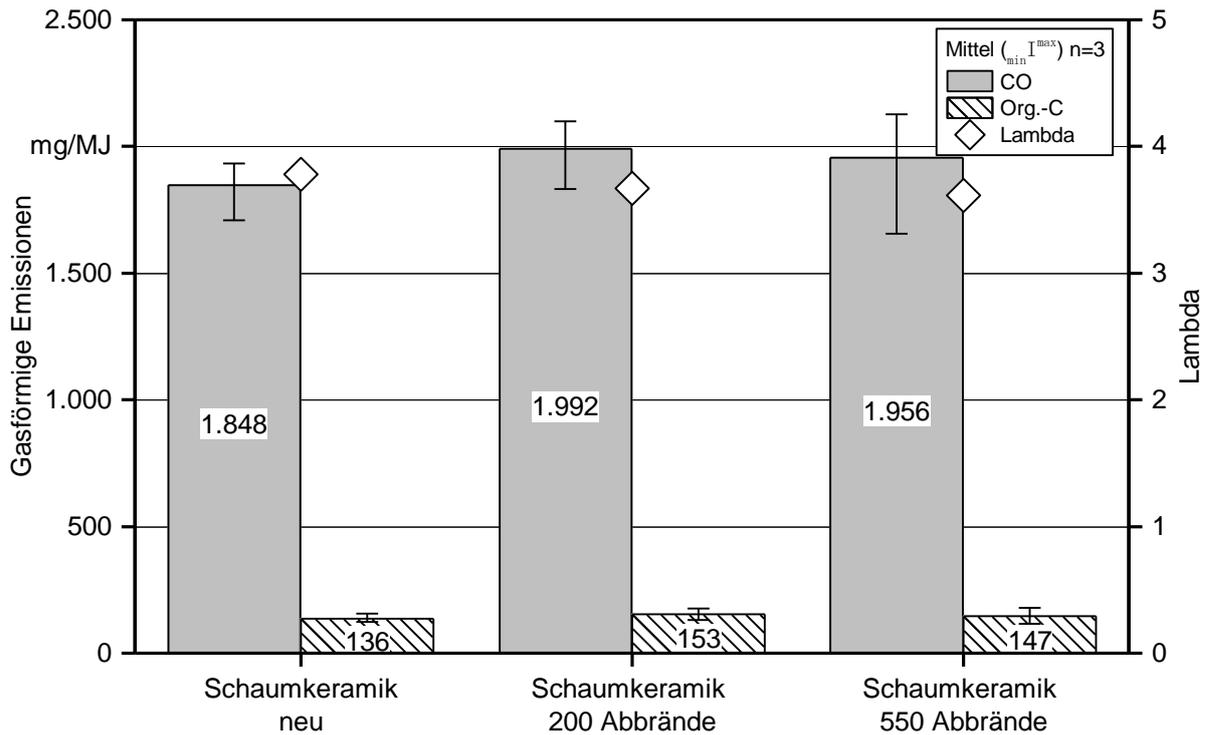


Abbildung 14: Gasförmige Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der drei untersuchten nicht katalytisch beschichteten Schaumkeramik-Paare im Vergleich

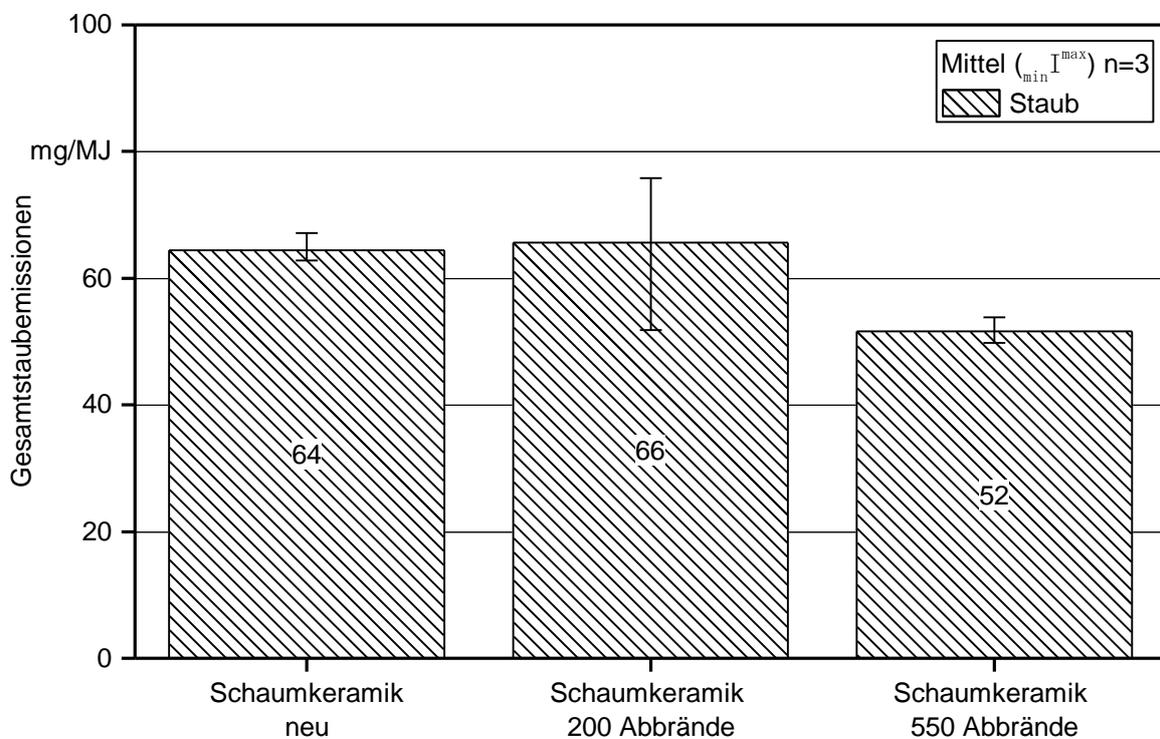


Abbildung 15: Gesamtstaubemissionen der drei untersuchten Schaumkeramik-Paare im Vergleich



Abbildung 16: Spülen der Schaumkeramikplatten und anschließendes Abdampfen der Spülflüssigkeit

Ein Versuch zur Abschätzung des Verschmutzungsgrads der Schaumkeramikplatten 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 Schaumkeramik-Paars mit 200 Abbränden vor bzw. 236 Abbränden nach Versuchsende (Tabelle 7). Die größte Menge an Rückständen hätte sich theoretisch jedoch in der Schaumkeramik mit 586 Abbränden (nach Versuchsende) wiederfinden müssen. Der mittlere Normvolumenstrom über acht Abbrände lag während der durchgeführten Messungen bei ca. 50–56 Nm³/h. Die mittlere Abbranddauer lag bei ca. 28 min inkl. Teillastabbränden. Daraus folgt ein mittleres Normvolumen von 23,5 bis 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 Abbildung 15) käme, würde dies einer akkumulierten 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 nennenswerte Abscheidung von Partikeln, selbst wenn man davon ausgeht, dass ein Teil der akkumulierten Partikel wieder verbrannt wird.

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

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

5.3 Ersatzes der Schaumkeramikelemente durch katalytisch beschichtete Schaumkeramikelemente

Für die Bewertung der katalytischen Schaumkeramik wurde die herstellerseitig verbaute nicht katalytische Schaumkeramik im Wechsel mit dem in Abschnitt 4.4 beschriebenen Katalysator und Dummy ausgetauscht und in je drei vollständigen Prüfzyklen à acht Abbränden vermessen. Somit folgte auf die Messung mit der nicht katalytischen Schaumkeramik eine Messung mit Katalysator, gefolgt von einer Messung mit Dummy. Diese Reihenfolge wurde dreimal 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, dass 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 Temperaturen nicht zu CO₂ aufoxidiert werden kann [7]. 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. Allerdings war auch diese Reduktion nicht signifikant.

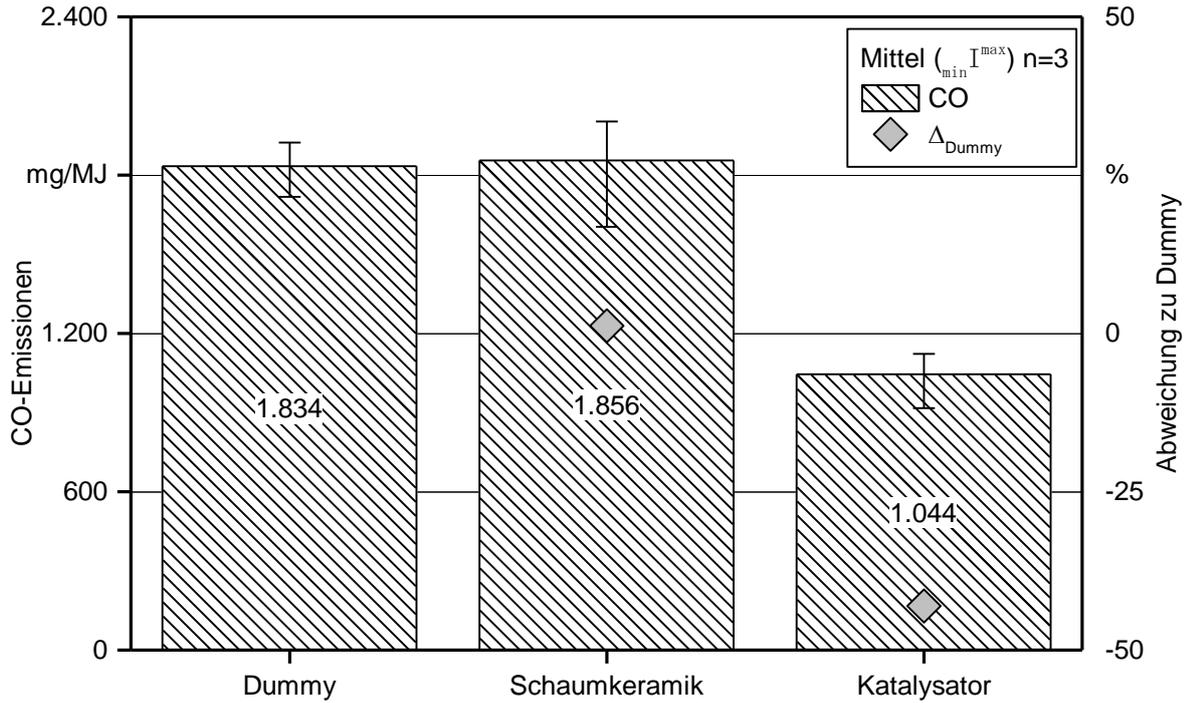


Abbildung 17: Vergleich der CO-Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ Dummy)

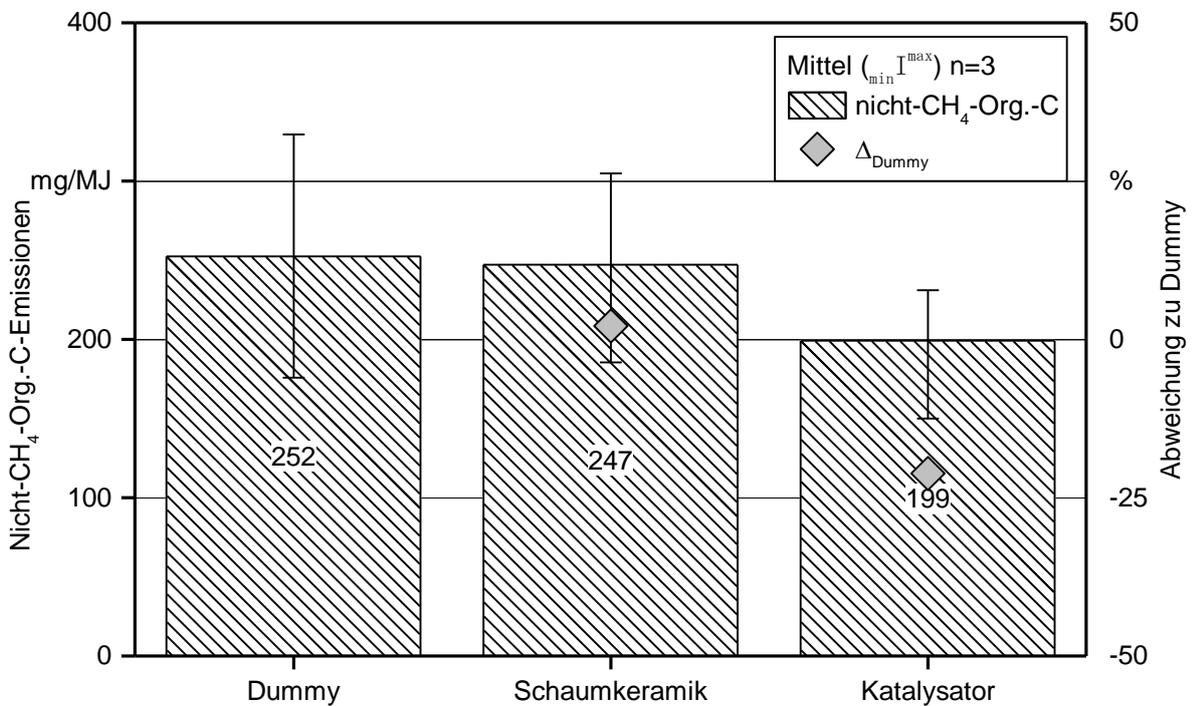


Abbildung 18: Vergleich der Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff-Emissionen mit Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ Dummy)

Wie erwartet zeigen die CH_4 -Emissionen (Abbildung 18) nahezu keinen Unterschied zwischen den untersuchten Elementen, da auch der Katalysator nicht auf eine katalytische Reduzierung von CH_4 ausgelegt ist. Hierzu ist die Temperatur am Katalysator (Abbildung 20) mit durchschnittlich $431\text{ }^\circ\text{C}$ während der Vollastabbrände und $399\text{ }^\circ\text{C}$ während der Teillastabbrände deutlich zu gering. Bei diesen Temperaturen verhält sich Methan noch sehr stabil, erst oberhalb von $650\text{ }^\circ\text{C}$ soll eine signifikante Umsetzung von Methan an heterogenen Katalysatoren möglich sein [7].

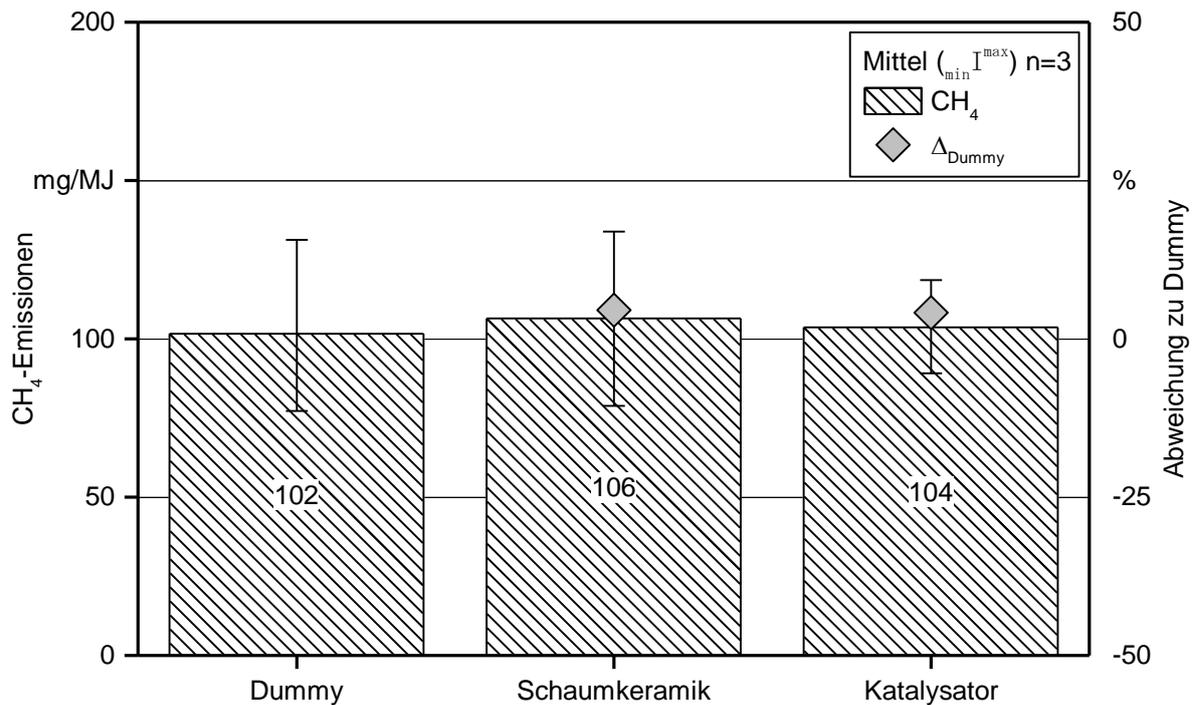


Abbildung 19: Vergleich der CH_4 -Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ_{Dummy})

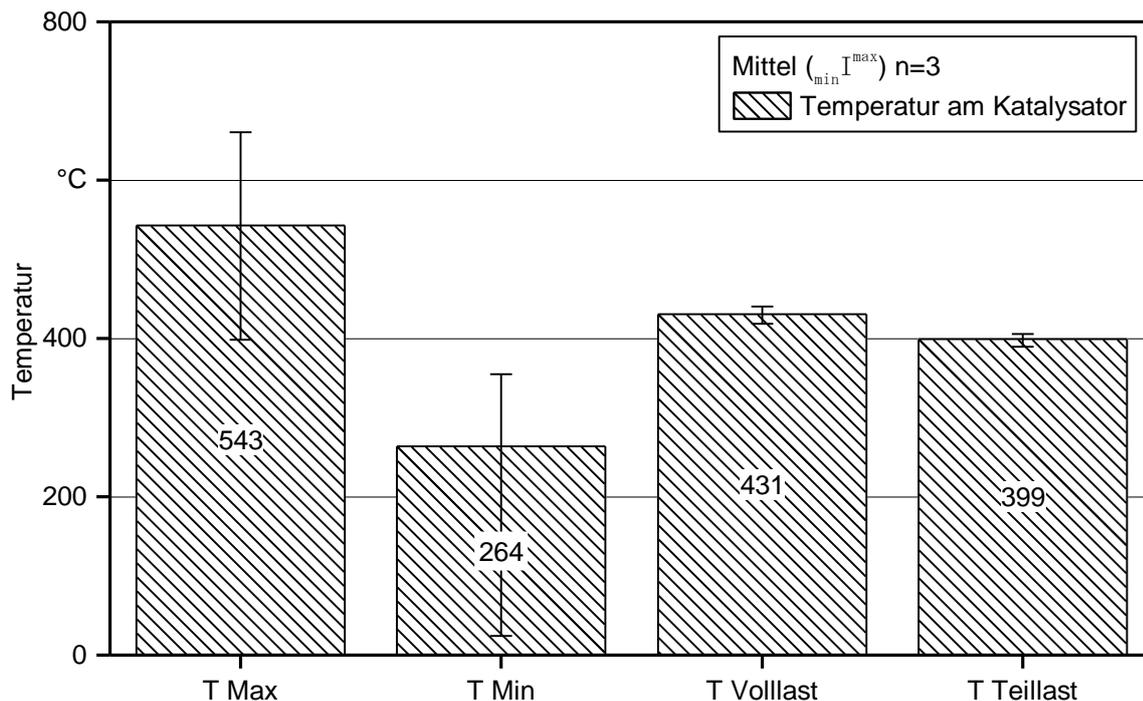


Abbildung 20: Maximale und minimale Temperaturen sowie durchschnittliche Temperaturen während der Messung bei Nenn- bzw. Teillast

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 4.4) sein. Die Druckverluste von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sind zwar vergleichbar, jedoch ist die Porosität des Dummies nur 0,9–1,1 ppi. Die Porosität des Katalysators ist mit 30 ppi dagegen der Porosität der Schaumkeramik (35 ppi) sehr ähnlich.

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 wird. 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 Projekts nicht mehr möglich waren.

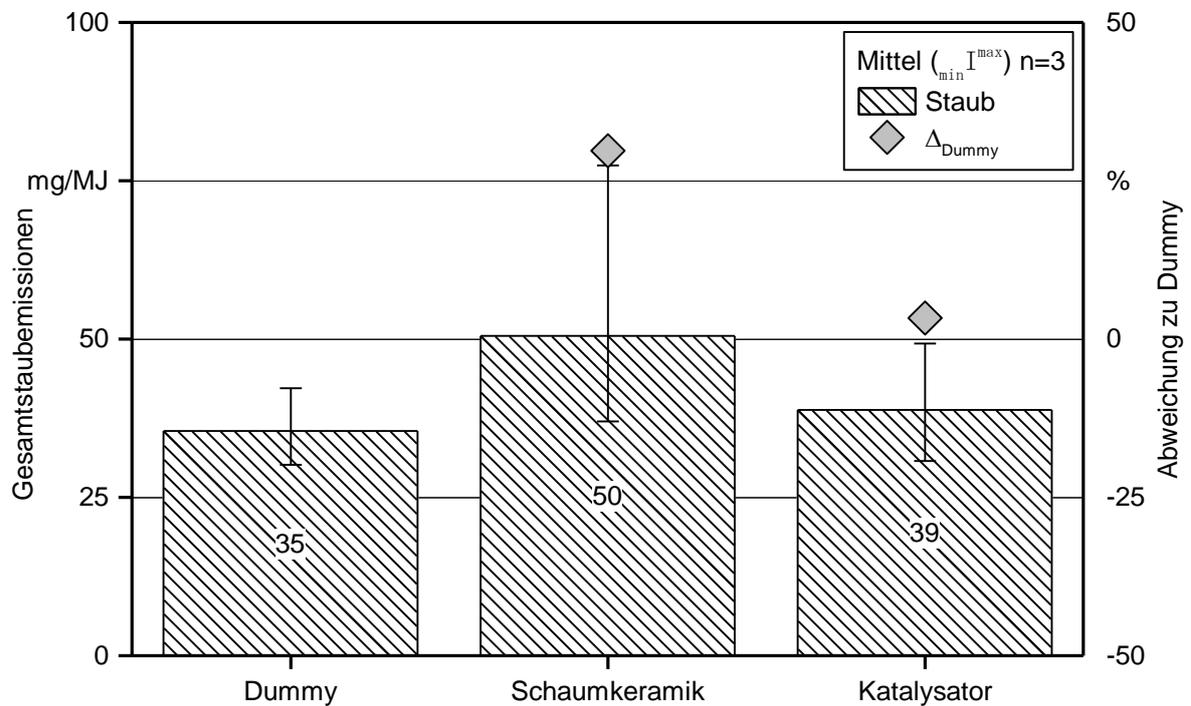


Abbildung 21: Vergleich der Gesamtstaubemissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ Dummy)

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 [3], in der verschiedene Katalysatoreinbauten direkt hinter dem Abgasstutzen eines Kaminofens getestet und ebenfalls niedrigere NO_x -Emissionen für den Referenzfall (in diesem 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 selbst, die ja auch das Trägermaterial des Katalysators darstellt, hindeuten.

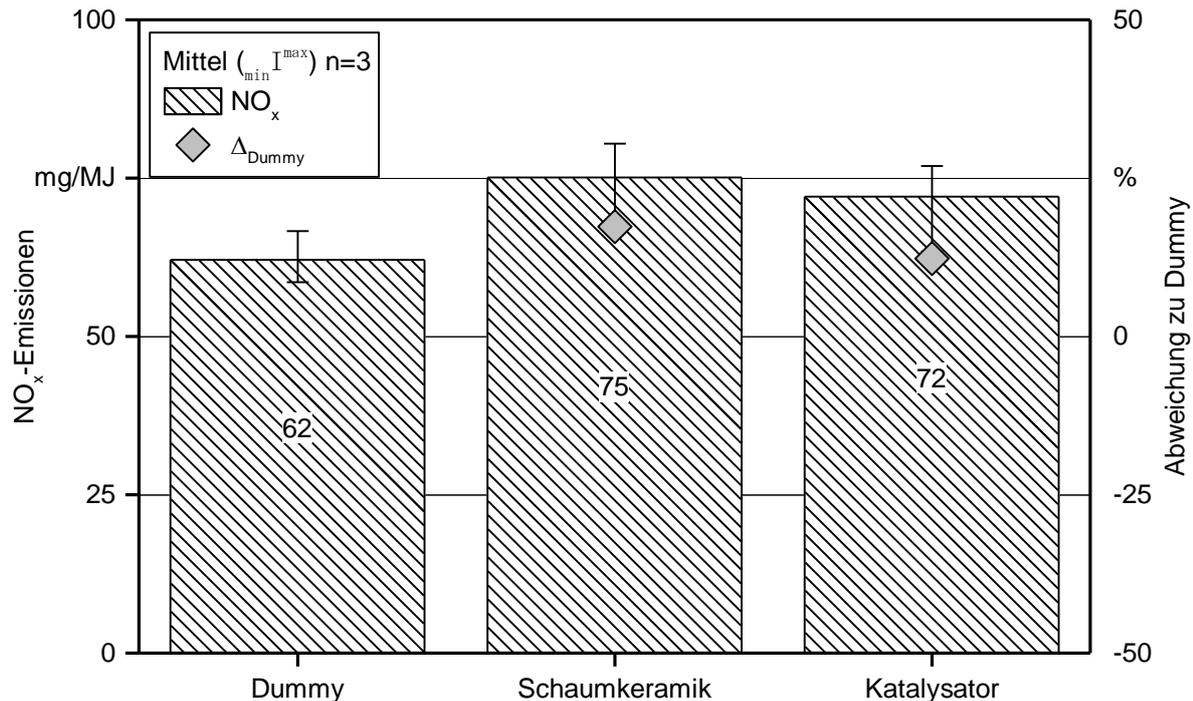


Abbildung 22: Vergleich der NO_x-Emissionen von Dummy, Schaumkeramik und Katalysator sowie die relative Abweichung bzw. Minderung der Emissionen zum Dummy (Δ Dummy)

Viele der beobachteten Ergebnisse lassen sich über die Temperatur am Katalysator erklären. Die Auswertung der mithilfe eines 1 mm starken Typ-K-Thermoelements erfassten 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 [8] [25] [26]. Diese Temperaturen können über den größten Teil der Nenn- und Teillastabbrände erreicht werden, sodass 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 [7] [25]. 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 °C und 400 °C, allerdings steigt die Konversionsrate ab der Aktivierungstemperatur bis ca.

800 °C an [7]. 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 sein könnten. Dies wurde auch von den anderen Projektpartnern innerhalb des Projekts beobachtet (siehe Catalyst Report [37]).

5.4 Langzeitverhalten des Katalysators

Um sicherzustellen, dass der Katalysator während der „Langzeitmessungen“ mit dem kompletten Abgas durchströmt wird, wurden alle bereits in Abschnitt 5.1 erkannten undichten Stellen mit feuerfestem Keramikkleber abgedichtet (Abbildung 23). Zusätzlich wurden Messstellen zur Erfassung der Feuerraumtemperatur und des statischen Drucks vor dem Katalysator eingerichtet.



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

Die Ergebnisse zu den Messungen an CO, Nicht-CH₄-Org.-C und Gesamtstaub an Tag 1 bestätigen die Ergebnisse aus Abschnitt 5.3 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 wiederhergestellt werden.

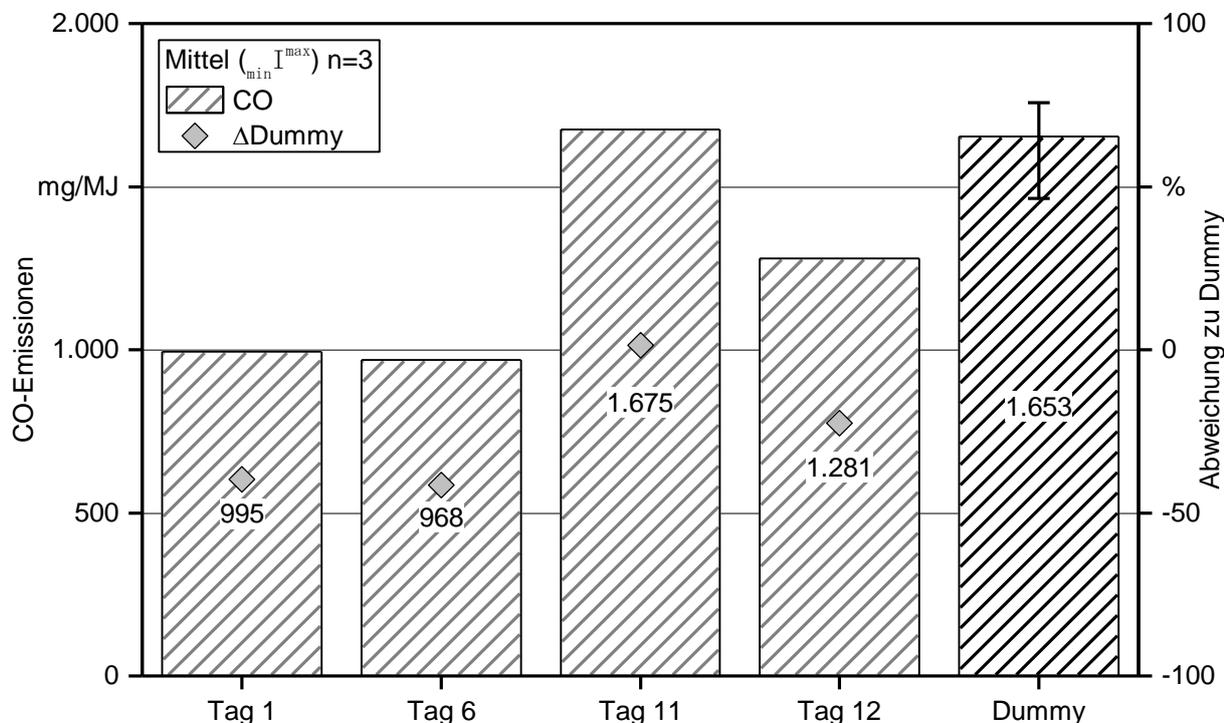


Abbildung 24: CO-Emissionen der Langzeitmessung (zwölf Werkzeuge mit jeweils acht Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus drei Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11) dar

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 Kohlenwasserstoffe steht. Die Gesamtstaubemissionen mit Katalysator an den Tagen 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 organischer Kohlenwasserstoffe), 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 5.3). 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.

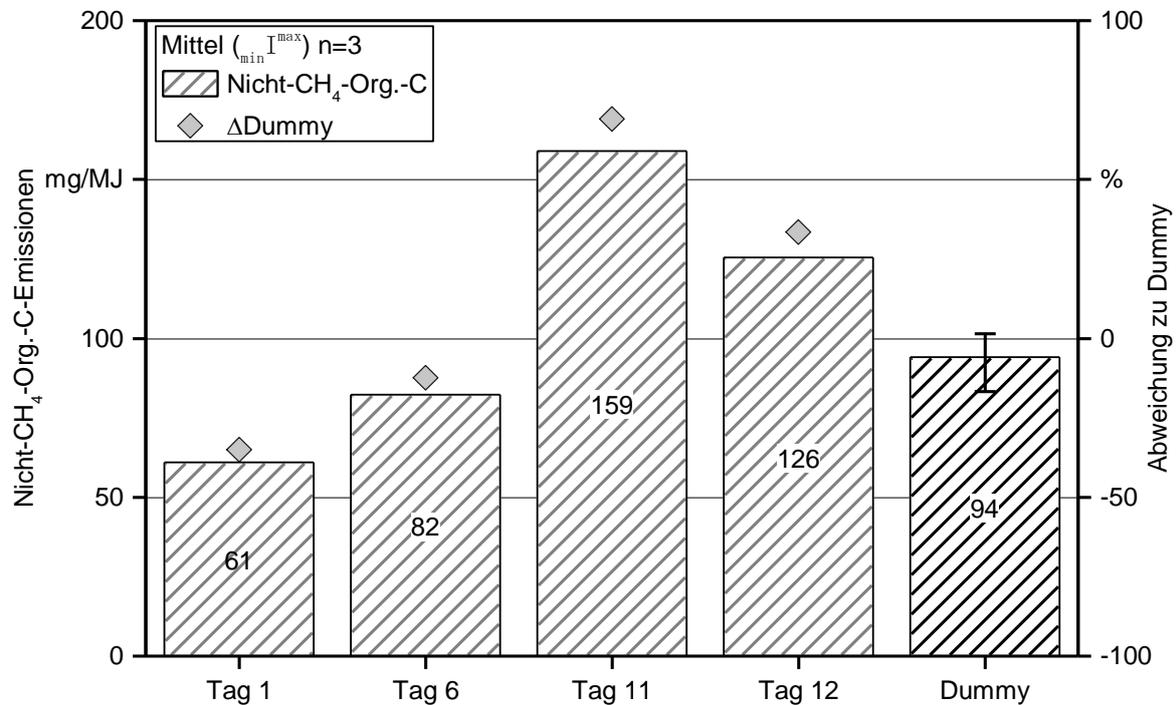


Abbildung 25: Nicht-CH₄-Org.-C-Emissionen der Langzeitmessung (zwölf Werkstage mit jeweils acht Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus drei Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11) dar

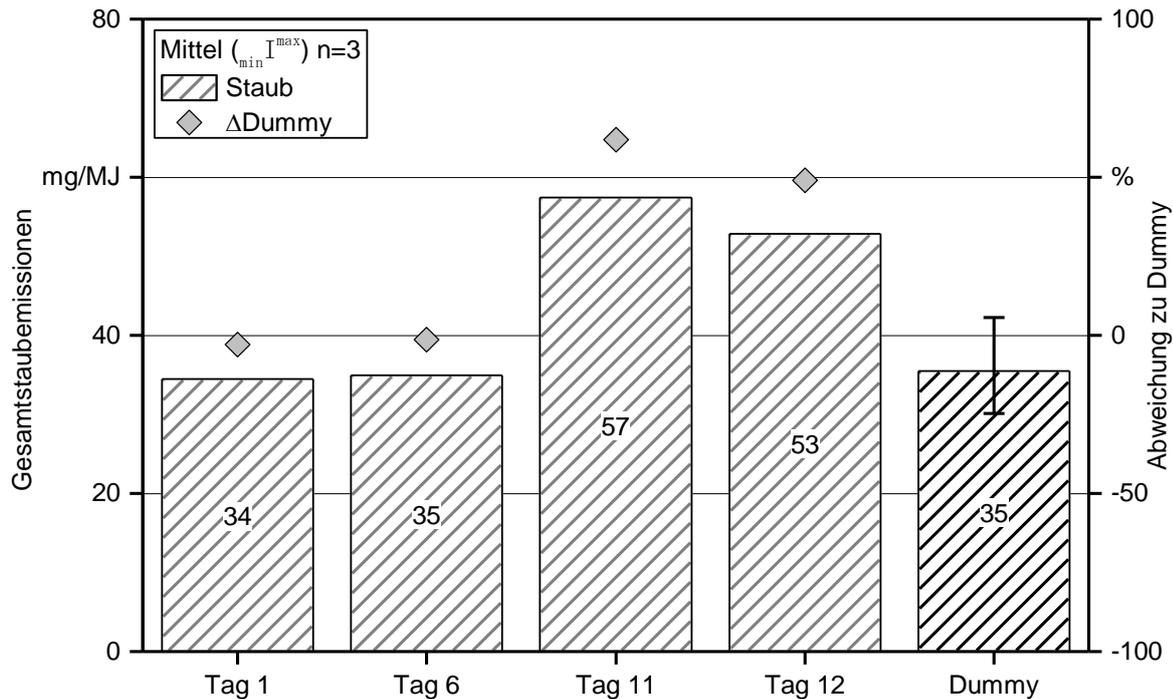


Abbildung 26: Gesamtstaubemissionen der Langzeitmessung (zwölf Werktage mit jeweils acht Abbränden) mit Reinigung des Katalysators vor Tag 12. Der Balken für den Dummy stellt einen Mittelwert aus drei Messtagen (nach Tag 1, 6 und 11) dar

Die Zunahme der CO-, Nicht-CH₄-Org.-C- und Gesamtstaub-Emissionen bis Tag 11 liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit an der zunehmenden Deaktivierung des Katalysators durch sogenannte Katalysatorgifte (z. B. Sulfate) im Abgas oder durch die Blockierung der aktiven Zentren des Katalysators durch Ablagerungen, wie z. B. Ruß [25; 26]. 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 her zu rühren. 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 mit der hier verwendeten Methode 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.

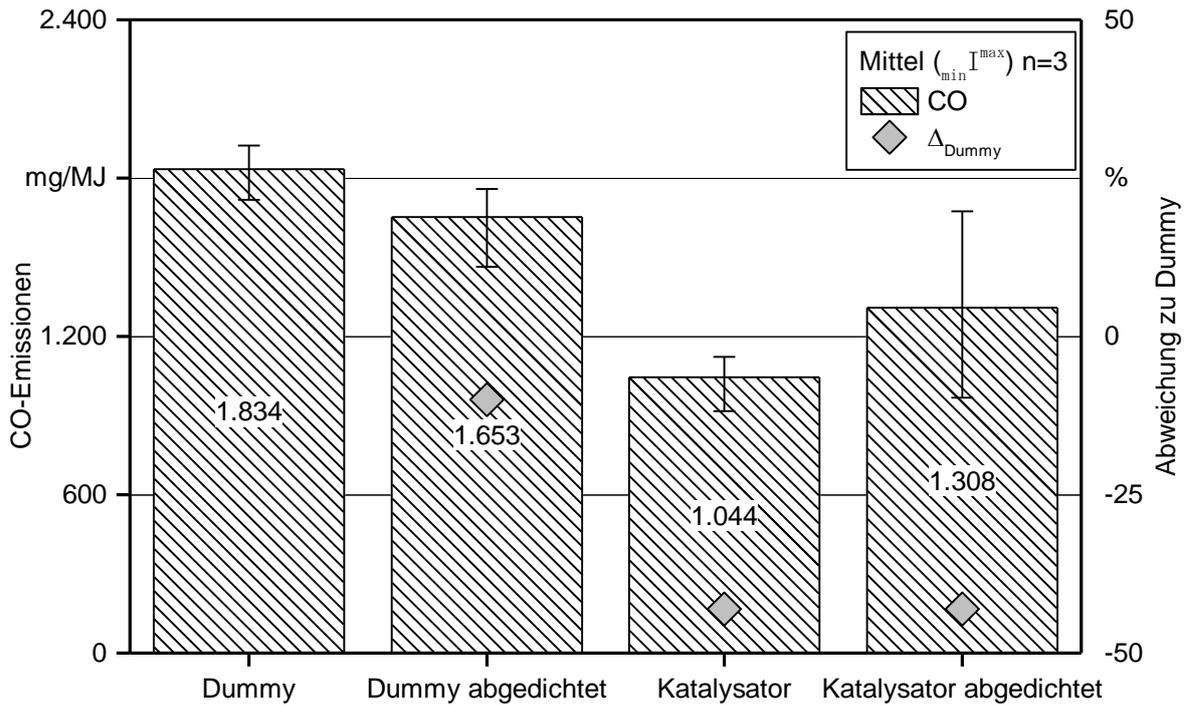


Abbildung 27: Vergleich der CO-Emissionen von Dummy und Katalysator vor und nach dem Abdichten mit feuerfestem Keramikkleber

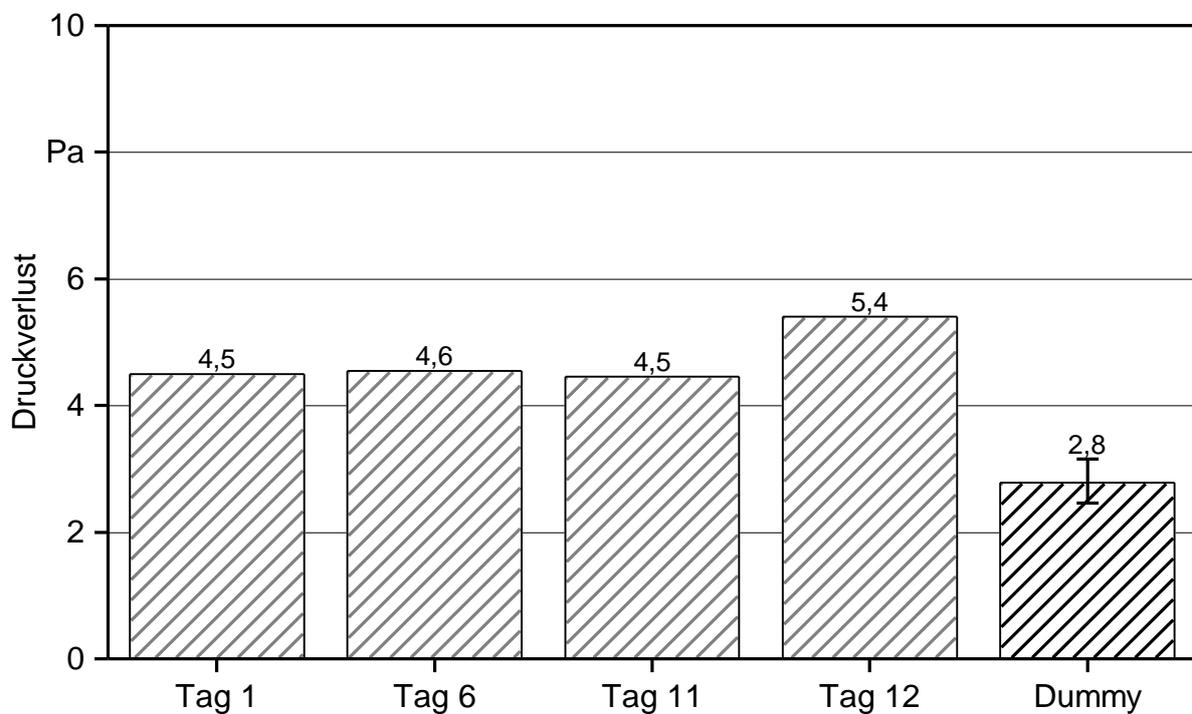


Abbildung 28: Druckverluste über den Katalysator und Dummy während des Langzeitversuchs

Der Druckverlust über den Katalysator (Messung des statischen Drucks vor und nach Katalysator) zeigte keine nennenswerte Zunahme während des Langzeittests (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 Druckverlusts 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 unterschiedlich hohe Druckverluste in Schaumkeramiken und Dummy ausbilden, was zu einem Primäreffekt auf die Verbrennung führt.

5.5 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 hier die Messung mit dem 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 vonseiten der Katalysatorhersteller realistische Angaben gemacht werden. Außerdem könnte das Waschen des Katalysators mit Wasser zu einer höheren Reaktivierung führen, was allerdings im Rahmen dieses Projekts nicht untersucht wurde. Der möglichen dauerhaften Abnahme der Aktivität des Katalysators durch Katalysatorgifte könnte eventuell 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, inwieweit die dauerhafte Deaktivierung des Katalysators voranschreitet und inwieweit 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 Rußablagerungen wieder verbrannt werden würden.

6 Quantifizierung von Stillstandverlusten über den Schornstein sowie Bewertung von Minderungsmaßnahmen an Öfen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Quantifizierung der Stillstandverluste durch Schornstein und Kaminöfen dargestellt. 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 [31]. 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 Stillstandverlusten wurden in dem Projekt „Wood Stove 2020“ untersucht: Stillstandverluste durch den Schornstein ohne Heizbetrieb (kalte Stillstandverluste) und die Verluste nach dem Ofenbetrieb, d. h. Verluste während des Abkühlens. Für die Versuche wurden die in Abschnitt 4.2 beschriebene Messtechnik und der Prüfstandsaufbau am Naturzugschornstein nach Abbildung 5 (rechts) verwendet. Die Bestimmung der Verluste nach dem Ofenbetrieb erfolgte nach der in Abschnitt 4.6 beschriebenen Prüfmethode. Außerdem wurden auch die Wetterdaten mittels einer auf dem Grundstück befindlichen Wetterstation aufgezeichnet.

6.1 Kalte Stillstandverluste

Die in Abschnitt 4.1 beschriebenen drei Kaminöfen (A, B und C) wurden jeweils über mehrere Wochen an einen 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 4.2, 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

nen 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 die verwendete 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 bildet (Verpuffungsgefahr).

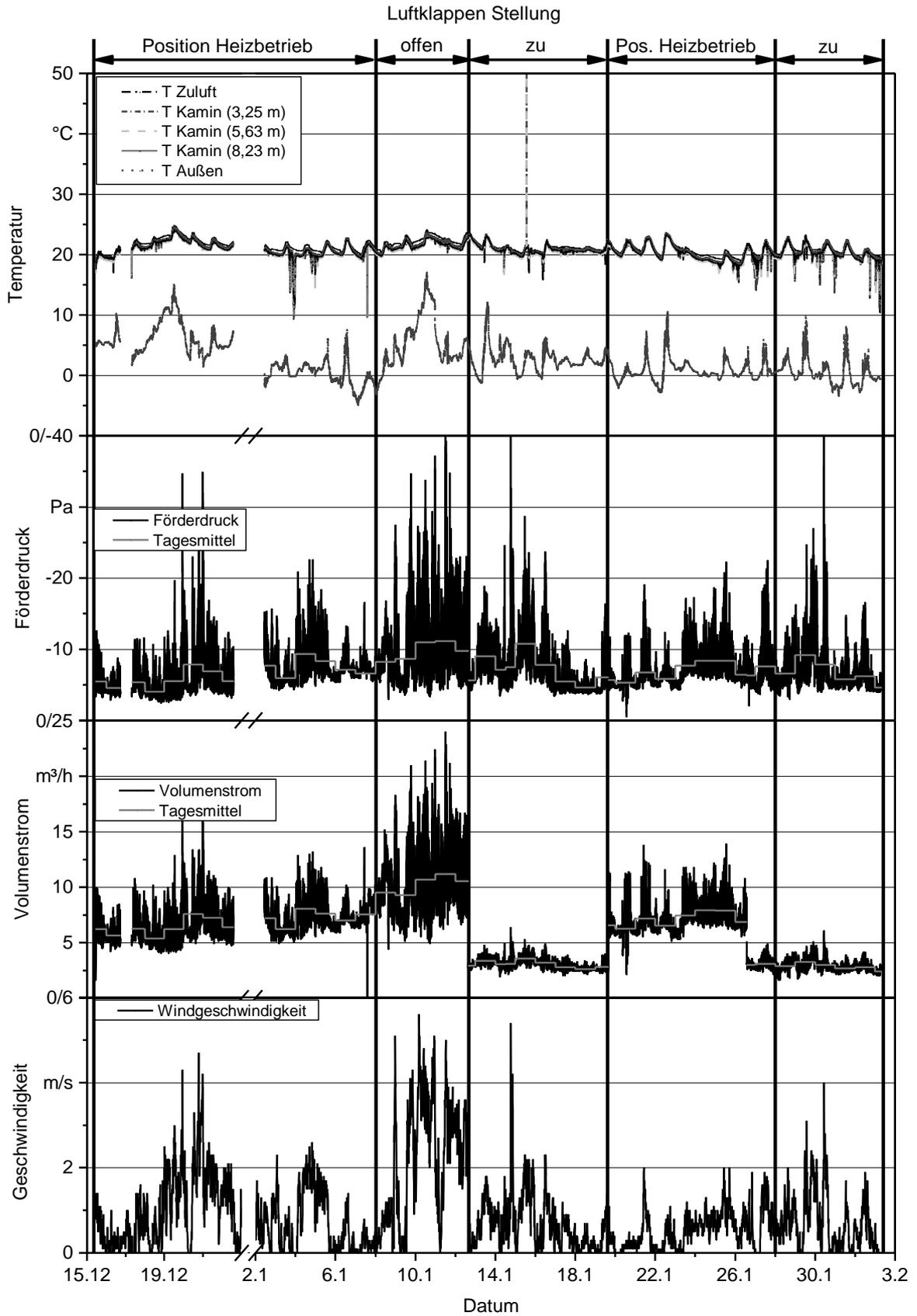


Abbildung 29: Grafische Darstellung der Messdaten des Monitorings von Kaminofen B (Messungen ohne Heizbetrieb)

Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der Monitoring-Dauer der untersuchten Öfen sowie die dabei verwendeten, im Folgenden gelisteten Luftklappenstellungen.

Kaminofen A:

- 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

Tabelle 8: Messzeiträume der untersuchten Kaminöfen bei der jeweiligen Luftklappeneinstellung

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	–	–	–	–

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

$$\dot{Q}_{\text{Schornstein}} = \dot{V}_{\text{Luft}} \times \bar{p}_{\text{Luft}} \times \bar{c}_{p,\text{Luft}} \times (\bar{T}_{\text{Schornstein}} - T_{\text{amb}}) \quad (6.1)$$

$$Q_{\text{Schornstein}} = \sum \dot{Q}_{\text{Schornstein}} \times \Delta t_{\text{Messung}} \quad (6.2)$$

Wobei:

$Q_{\text{Schornstein}}$ = 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,

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

$\bar{c}_{p,\text{Luft}}$ = 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.

Tabelle 9: Mittelwerte aus den Messdaten zu den kalten Stillstandsverlusten sowie mittlere berechnete monatliche Verluste (n. a. = nicht analysiert)

Ofen/Luftklappeneinstellung	Schornsteinzug	Volumenstrom \dot{V}_{air}	$\bar{T}_{\text{Schornstein}}$	T_{amb}	$\dot{Q}_{\text{Schornstein}}$	Berechnete monatliche Verluste
	[Pa]	[m ³ /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

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 Kaminöfen A, zwischen 19,5 und 40,0 kWh/Monat für Kaminöfen B und zwischen 12,0 und 31,7 kWh für Kaminöfen C. Im Fall der geschlossenen Luftklappen wiesen also alle drei

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.

6.2 Verluste während des Abkühlvorgangs nach dem Betrieb des Kaminofens (warme Stillstandsverluste)

Zur Ermittlung der Wärmeverluste nach dem Betrieb eines Kaminofens wurden mit Kaminofen A insgesamt zwölf Versuche durchgeführt (abwechselnd sechs Versuche mit Luftklappe in der zuletzt während des Heizbetriebs eingestellten Position (siehe Tabelle 10) und sechs 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 geschlossen) in Abbildung 30 für einen ausgewählten Messdurchgang dargestellt.

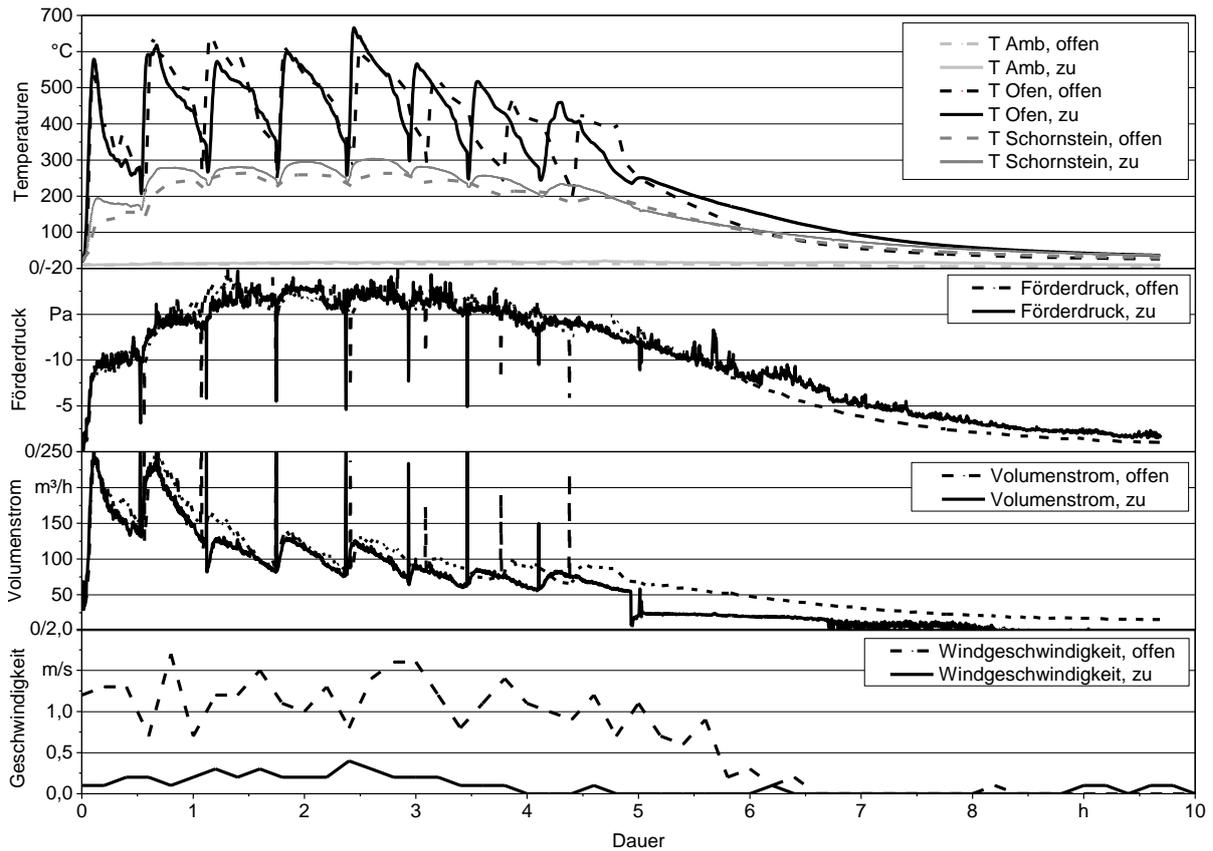


Abbildung 30: Vergleich des Abkühlvorgangs von Kaminofen A nach acht Abbränden bei geöffneten und geschlossenen Zuluftklappen

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.

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

Messparameter	Einheit	Luftklappenstellung nach Heizbetrieb „offen“ (O1 bis O6)					
		O1	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 während 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	Pa	-3,9	-20,3	-23,3	-27,7	-33,1	-42,5
Mittlerer atmosphärischer Druck	mbar	974	978	991	988	970	962

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 m-% Wassergehalt [6]) 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 (acht Abbrände nach der in Abschnitt 4.6 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.

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

Messparameter	Einheit	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 während 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	Pa	-5,3	-6,9	-21,3	-26,3	-29,3	-38,6
Mittlerer atmosphärischer Druck	mbar	984	969	985	994	987	976

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 Strömungswiderstand (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 ($R^2 = 0,96$).

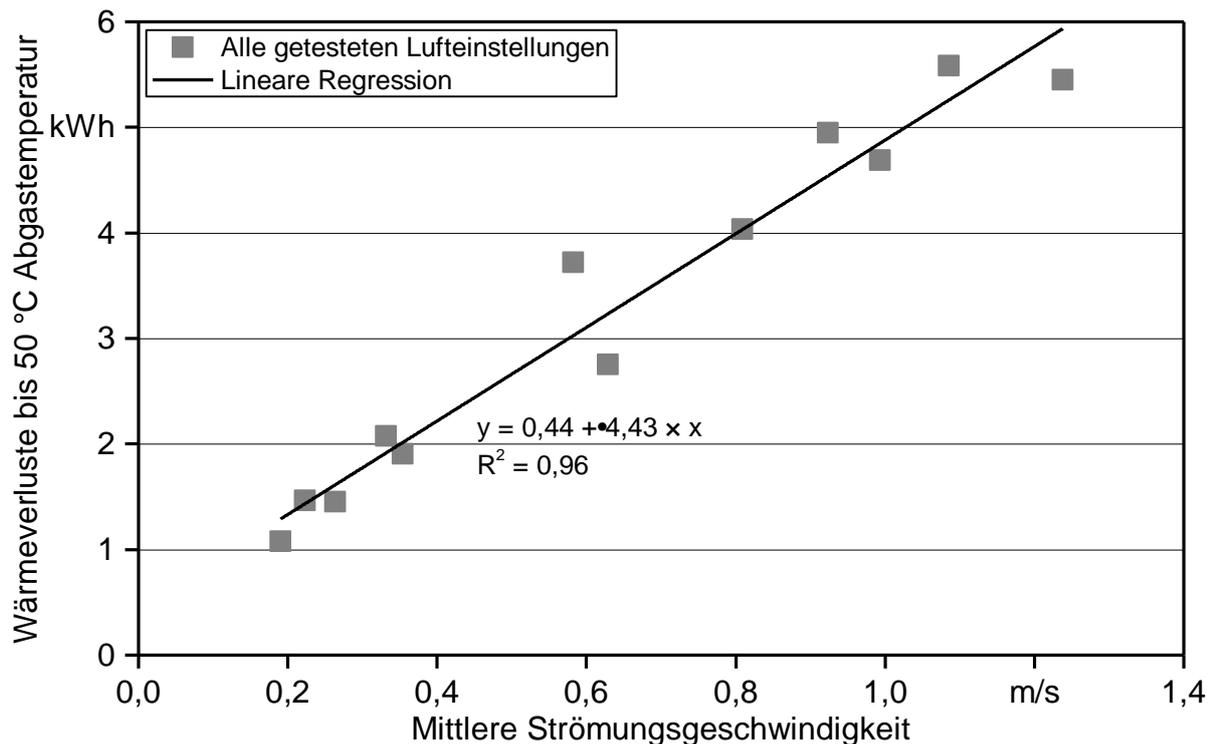


Abbildung 31: Lineare Regression der Wärmeverluste aller gemessenen Klappenstellungen zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Abgas während des Abkühlvorgangs von Kaminöfen A

6.3 Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung von Stillstandverlusten

Um eine Abschätzung der Höhe aller jährlich aufsummierten Stillstandverluste (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 bis 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 Stillstandverluste des hier untersuchten 8-kW-Kaminofen folgender Zusammenhang:

Klappe in letzter „Heizposition“:

$$Q_{\text{Stillstand}} = n_{\text{Heizbetrieb}} \times 4,6 \text{ kWh} + \frac{(213 \times 24 \text{ h} - n_{\text{Heizbetrieb}} \times 9 \text{ h}) \times 68 \text{ W}}{1000} \quad (6.3)$$

Klappe nach letztem Abbrand geschlossen:

$$Q_{\text{Stillstand}} = n_{\text{Heizbetrieb}} \times 1,9 \text{ kWh} + \frac{(213 \times 24 \text{ h} - n_{\text{Heizbetrieb}} \times 9 \text{ h}) \times 19 \text{ W}}{1000} \quad (6.4)$$

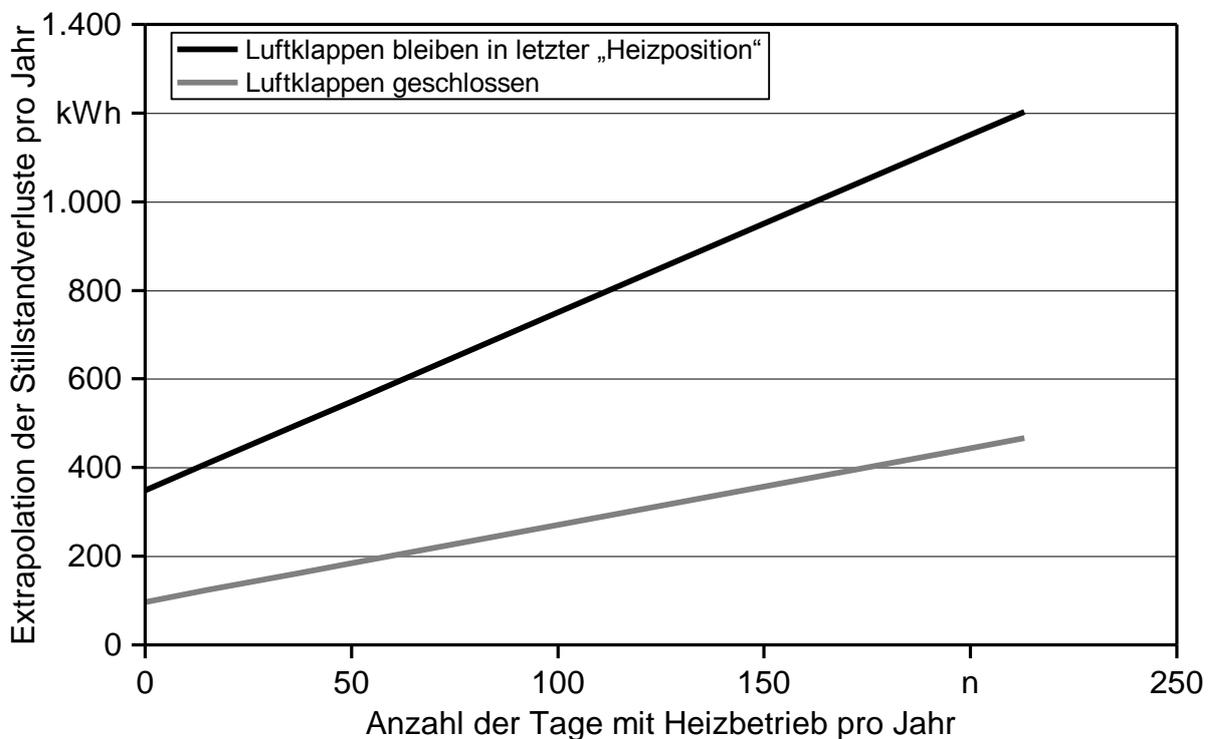


Abbildung 32: Extrapolation der Summe der Stillstandverluste bei kaltem Schornstein und während des Abkühlvorgangs nach dem Heizbetrieb in Abhängigkeit der Tage mit Heizbetrieb

Abbildung 32 zeigt eine grafische Darstellung der beschriebenen Extrapolation der jährlichen Stillstandverluste für die beiden untersuchten Luftklappeneinstellungen. Nimmt man eine nach Umfrageergebnissen aus dem EU-Projekt „beReal“ [52] realistische typische Anzahl von vier bis fünf Abbränden (ca. 4 h Heizbetrieb) und 100 Heizbetriebe pro Jahr an, so erhält man rund 270 kWh/a Stillstandverluste bei geschlossenen Luftklappen und rund 750 kWh/a Stillstandverluste, 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 [4] einem monetären Verlust von 16,3–45,2 €/a.

Im Rahmen des hier dargestellten Projekts 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 7). Allerdings sind die Sicherheitsvorschriften für solche Bauteile derzeit nicht normiert. 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 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 € [33]. 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 €/l 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 Stillstandverluste des Kaminofens sehr hoch ist und die Wirtschaftlichkeit der Produkte alleine für diesen Anwendungszweck infrage stellt.

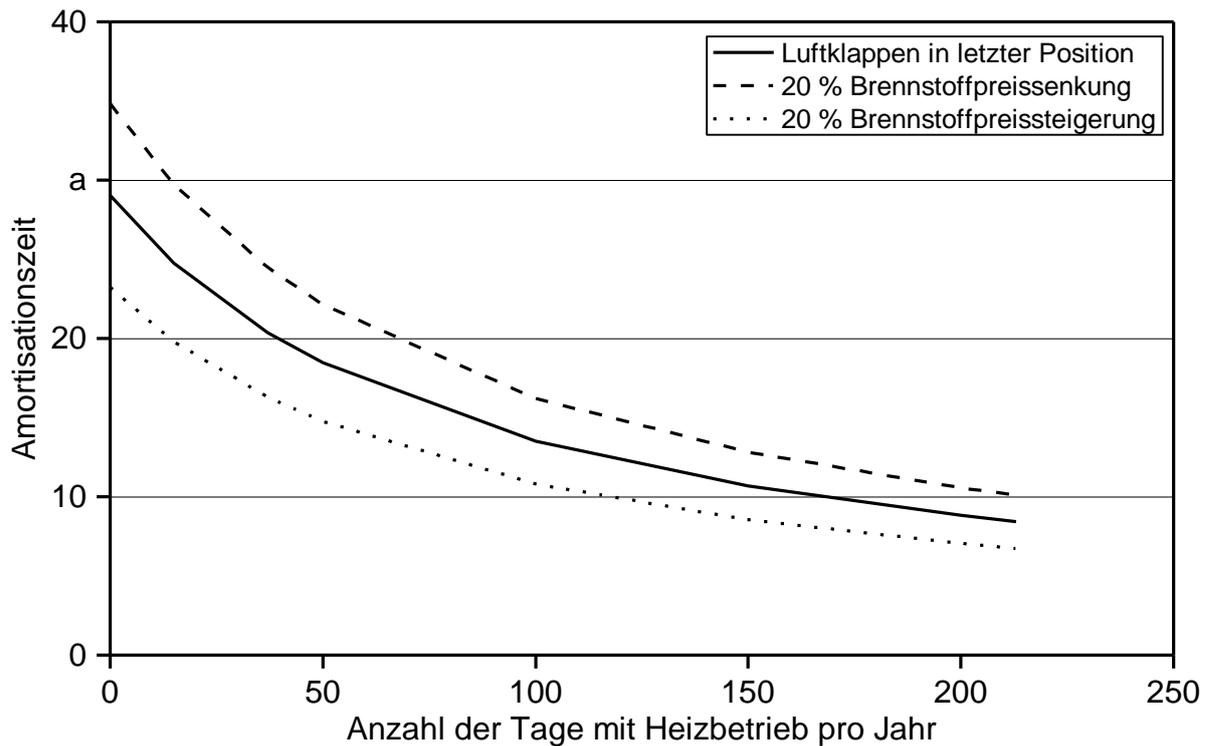


Abbildung 33: Amortisationszeit der Zuluftklappe LKF der Firma Kutzner + Weber GmbH in Abhängigkeit der Tage mit Heizbetrieb pro Jahr (Annahmen: Ofen dient als sekundäre Heizung; primär wird mit Öl-Kessel geheizt; Ölpreis = 0,66 €/l; Jahresnutzungsgrad Öl-Kessel = 75 %)

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. 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 aufwändig sein muss, um z. B. das Ende des zweiten Abbrands vom Ende des letzten Abbrands zu unterscheiden, damit ein zu frühes automatisches Schließen vermieden wird. Als vermutlich sinnvollere Alternative könnten sich günstige nachrüstbare Steuerungen anbieten, deren Elektronik zwar ähnlich komplex ist, die aber weitere Vorteile, z. B. bezüglich des Emissionsverhaltens, bieten könnten (siehe Abschnitt 7).

7 Prüfung und Bewertung nachrüstbarer Verbrennungsluftsteuerungen und Zugluftbegrenzer

Im Laufe des Projekts wurden insgesamt drei temperaturgeführte Verbrennungsluftsteuerungen sowie ein elektronischer und ein mechanischer Zugbegrenzer untersucht (siehe Abschnitt 4.5, Tabelle 5). Dabei wurden die Verbrennungsluftsteuerungen, wie im Methodenteil bereits beschrieben (siehe Abschnitt 4.6), bei einem regeltem 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 der ersten zwei Abbrände (Anzünden und Aufheizen) komplett offen gelassen und für die darauffolgenden Abbrände (3–8) 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 Abbrands (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“.

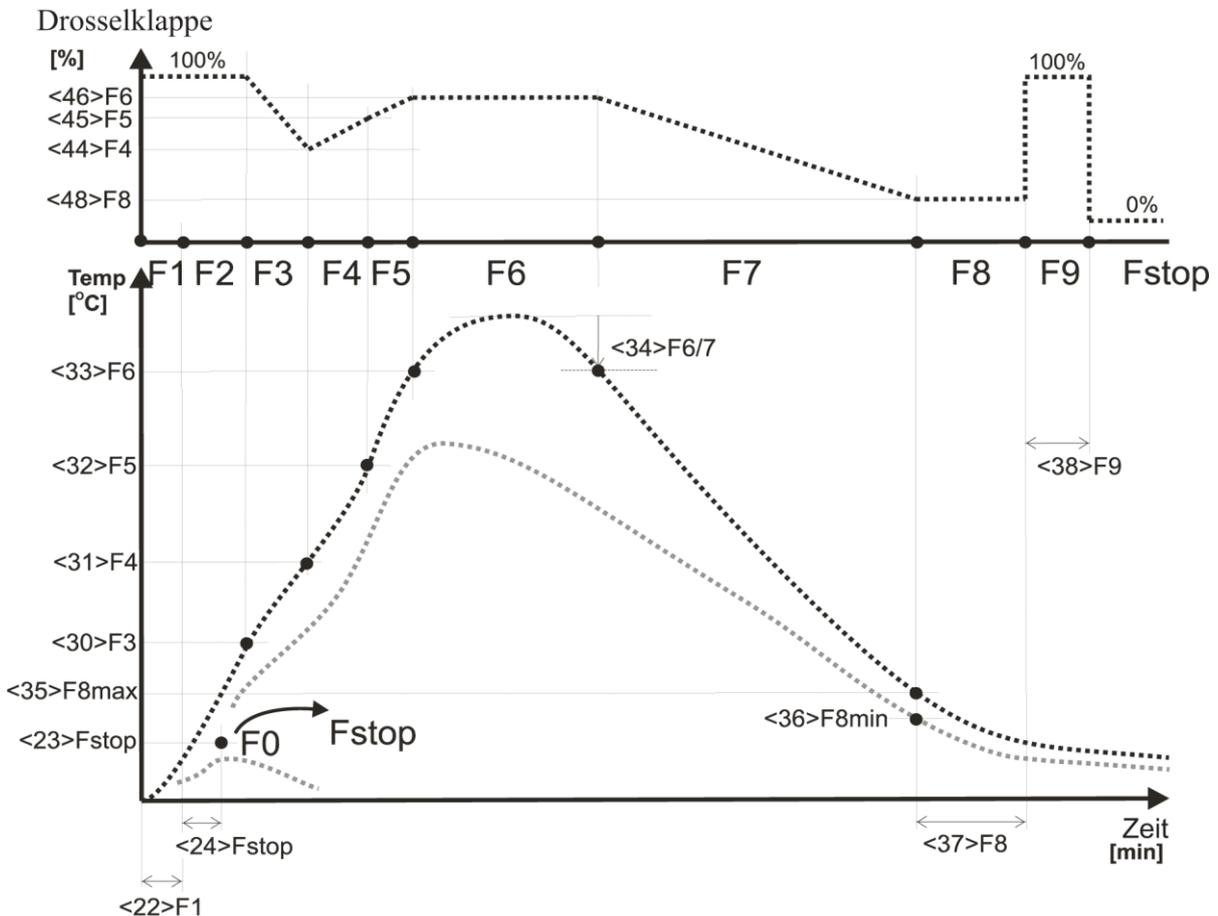


Abbildung 34: Steuerungparameter der TATAREK-Steuerung in grafischer Darstellung [49]

7.1 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 geregelterm 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 elektronische Zugbegrenzer zu einer Verringerung der gasförmigen Emissionen führte (CO: -13 %; Org.-C: -27 %). Die Zunahme der Emissionen bei dem mechanischen Zugbegrenzer ist vermut-

lich damit zu begründen, dass die hier verwendete Einzelraumfeuerstätte bei hohem Schornsteinzug bereits sehr niedrige Emissionen aufweist (siehe auch Abschnitt 9). 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 [2].

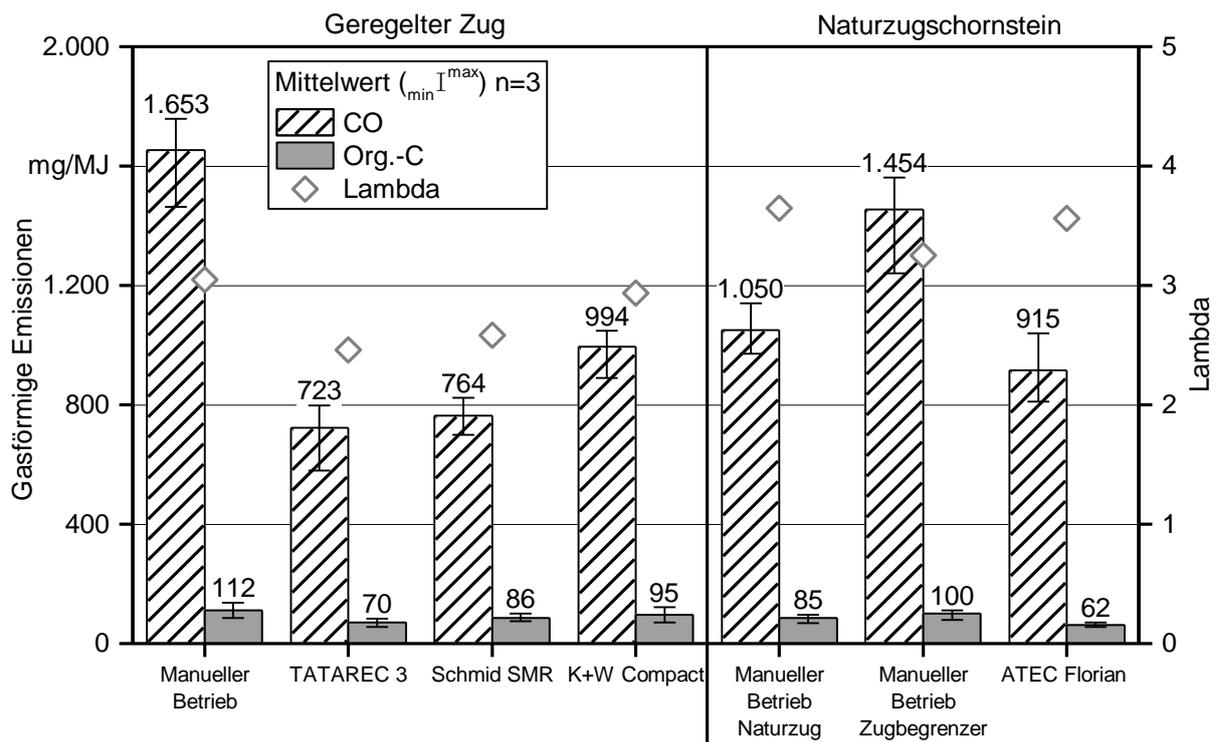


Abbildung 35: Vergleich der gasförmigen Emissionen der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder mit dem Naturzugschornstein

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-Kriteriums (siehe Abschnitt 4.6) 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 vierten 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.

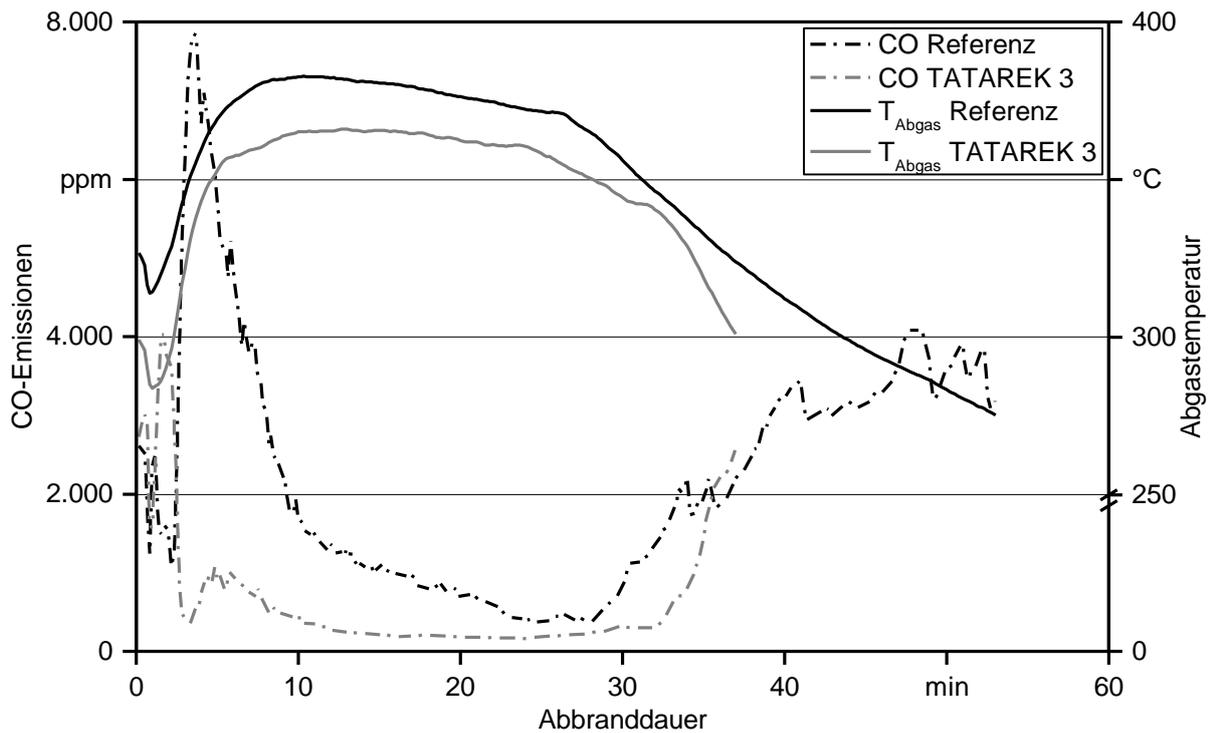


Abbildung 36: Direkter Vergleich der CO-Emissionen und Abgastemperaturen des vierten Abbrands bei manuellem Betrieb mit dem vierten Abbrand bei Verwendung einer Ofensteuerung nach Optimierung der Steuerungsparameter (TATAREK 3)

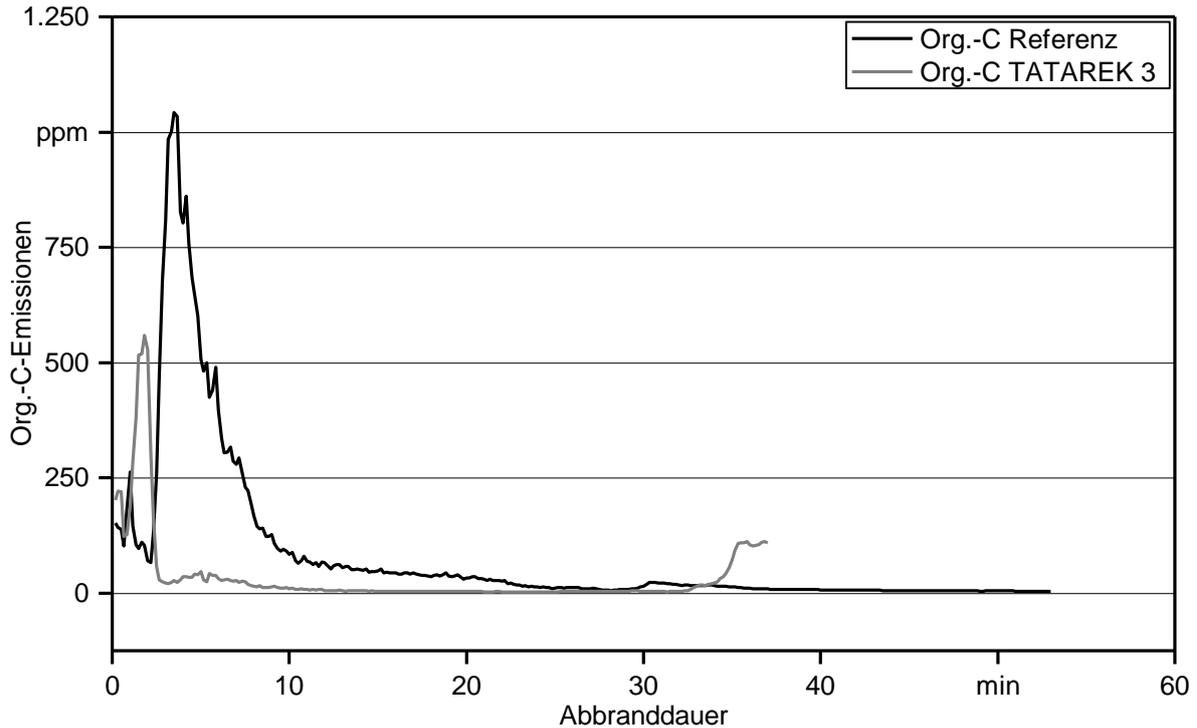


Abbildung 37: Direkter Vergleich der Org.-C-Emissionen des vierten Abbrands bei manuellem Betrieb mit einem vierten Abbrand bei Verwendung einer Ofensteuerung nach Optimierung der Steuerungsparameter (TATAREK 3)

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 Abbranddauer um ca. 9–10 min (siehe Abbildung 38).

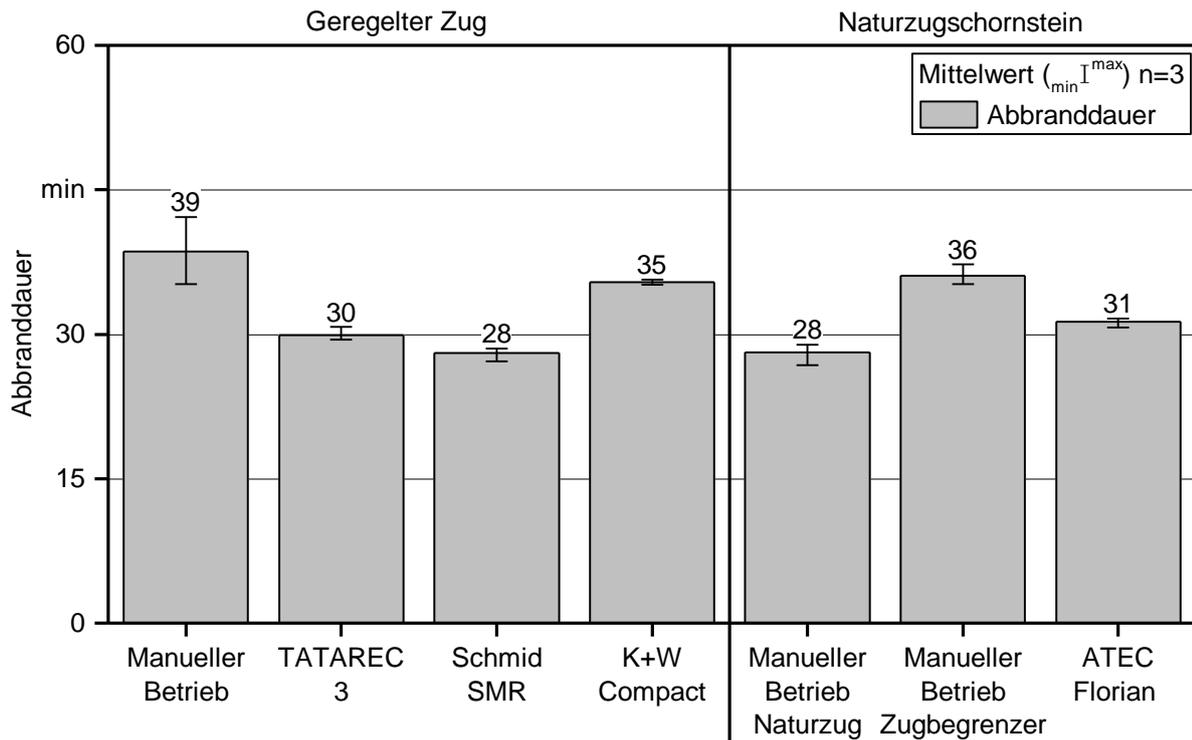


Abbildung 38: Mittlere Abbranddauer der verschiedenen Steuerungen und Zugbegrenzer im Vergleich

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 TATAREK (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) [32]. Gegen Ende eines Abbrands werden dagegen verhältnismäßig wenige Partikel freigesetzt, zumal hier der Großteil des Brennstoffes bereits umgesetzt ist [32]. Da bei Messung der partikelförmigen Emissionen nach VDI 2066-1 [51] die gesammelte Filterbeladung auf den über den Filter abgesaugten Normvolumenstrom (1.013 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 [38].

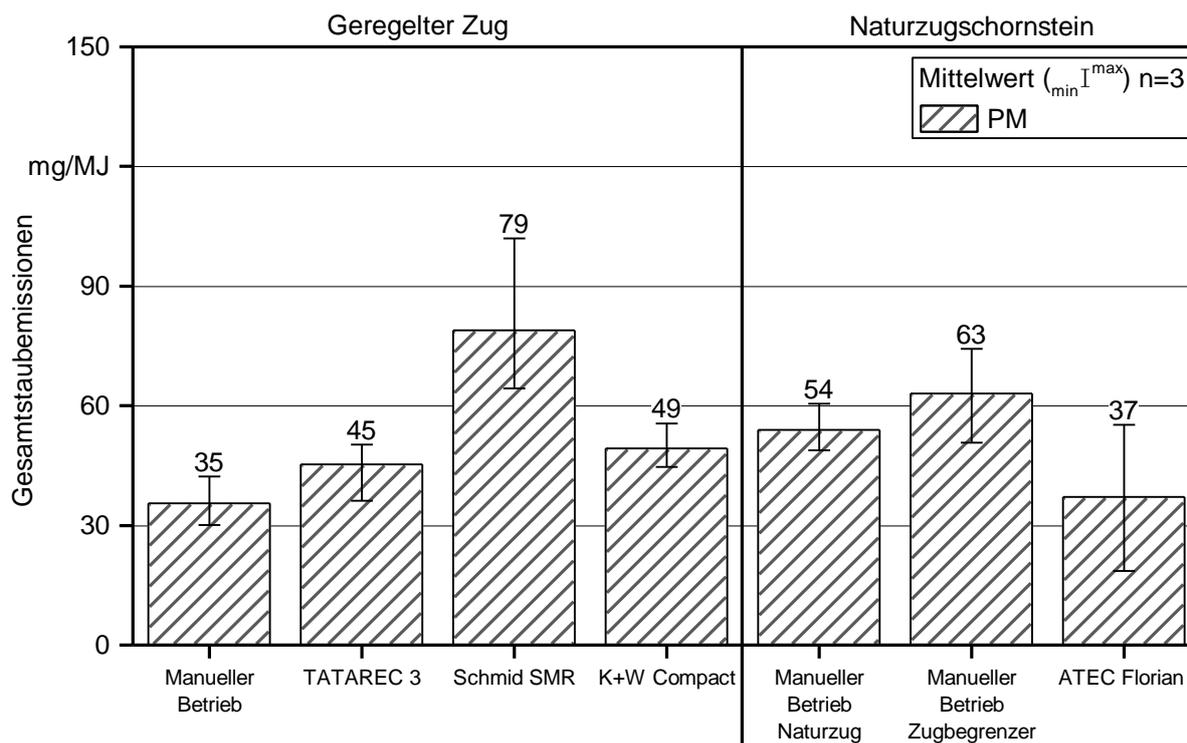


Abbildung 39: Vergleich der Gesamtstaubemissionen (PM) der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder Naturzugschornstein

Betrachtet man die durch den Batchbetrieb und die Folge einzelner einander bedingender Abbrände hervorgerufenen großen Schwankungen bei den Gesamtstaubemissionen (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.

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

Die Wirkungsgrade sowie die einzelnen Wirkungsgradverluste (siehe auch Abschnitt 4.6) 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/die Betreiber/in den Ofen be-

lässt wenn er/sie 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 6).

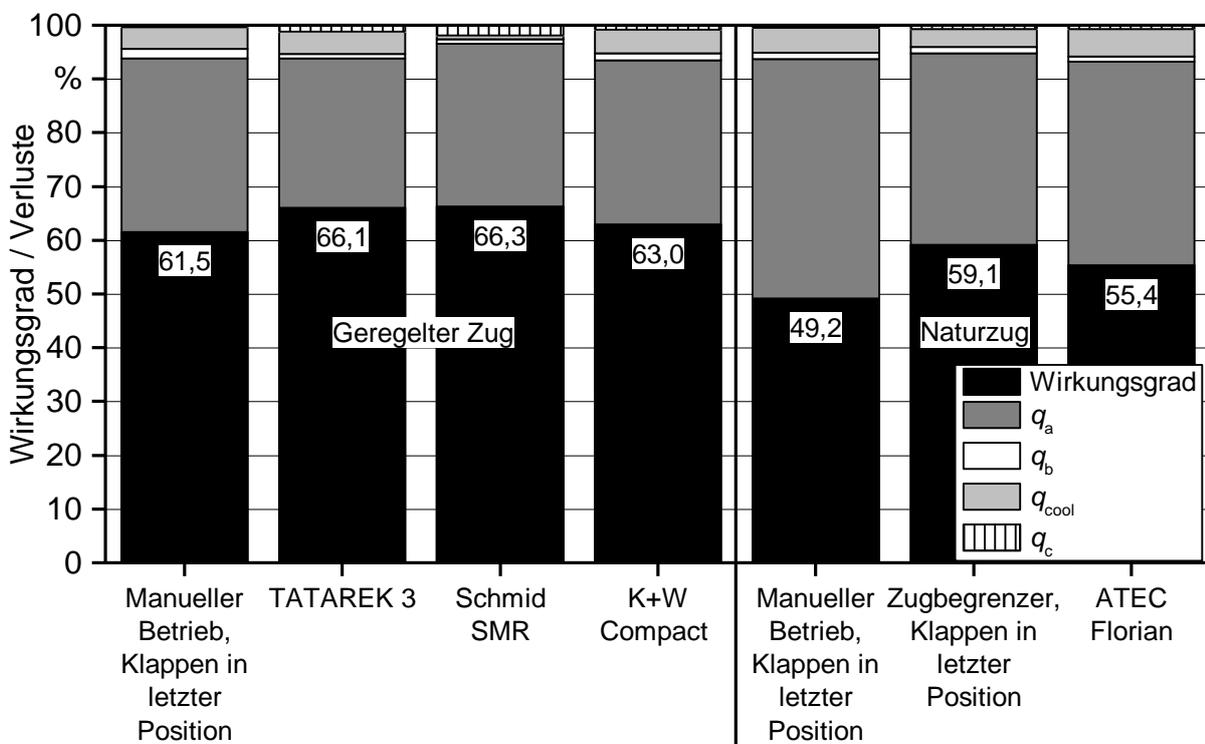


Abbildung 40: Vergleich der Wirkungsgrade und Verluste der Verbrennungsluftsteuerungen und der Zugbegrenzer mit dem manuellen Betrieb am geregelten Zug oder Naturzugschornstein. (q_a thermische Verluste während dem Betrieb, q_b chemische Verluste der Verbrennung, q_{cool} Wärmeverluste nach dem Betrieb bzw. während der Abkühlphase, q_c Verluste durch unverbrannte Rückstände vgl. Abschnitt 4.6)

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 Verbrennungsluftsteuerungen 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 Luftklappen 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 Luftklappen 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

7.3 Zusammenfassende Bewertung der Verbrennungsluftsteuerungen und Zugbegrenzer

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit nachrüstbaren Verbrennungsluftsteuerungen die gasförmigen Emissionen deutlich reduziert werden können. Bei den Gesamtstaubemissionen 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 Verbrennungs-

luftsteuerung 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. 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 TATAREK Steuerung allerdings eine Amortisationszeit von ca. 25 Jahren. Dies macht nochmals deutlich wie wichtig es ist, Stillstandsverluste zukünftig konsequenter zu vermeiden.

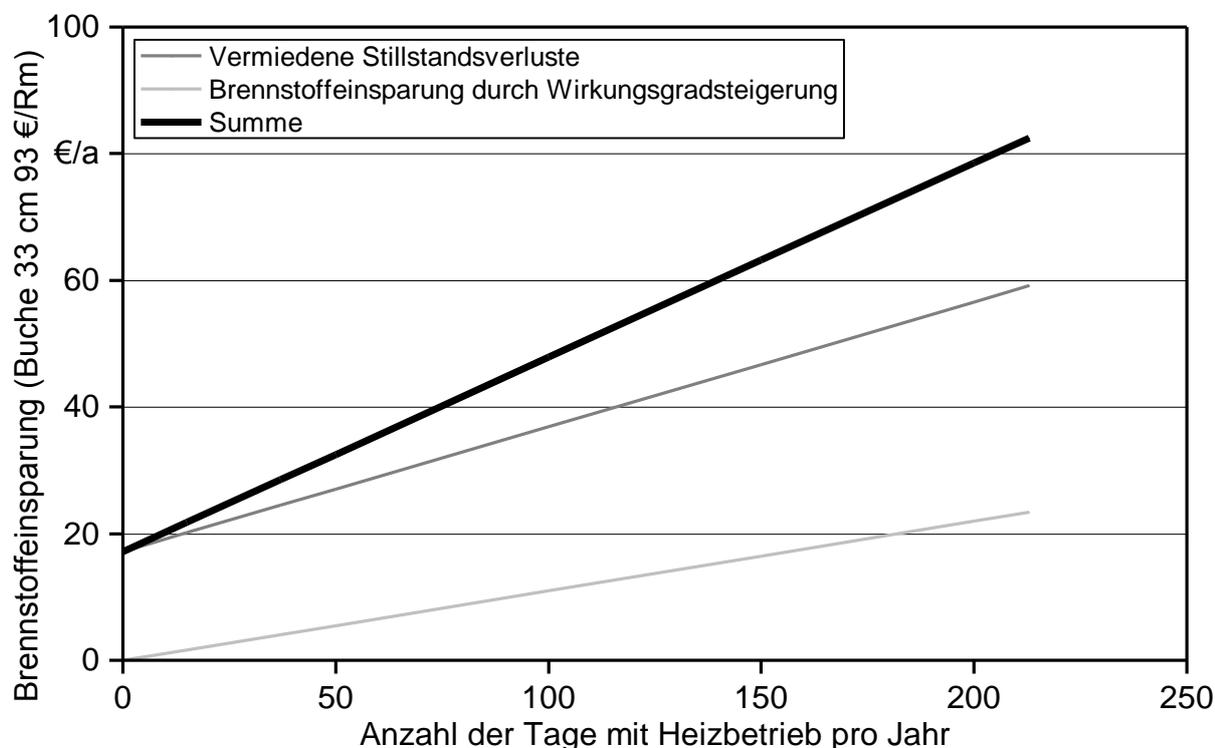


Abbildung 41: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anzahl an Tagen mit Heizbetrieb pro Jahr, berechnet am Beispiel der Schmid SMR Verbrennungsluftsteuerung

Die Abnahme hinsichtlich möglicher Sicherheitsrisiken erfolgt wie bereits in Abschnitt 6 beschrieben durch das DIBt (national) oder die ETA (Europa). Die Kosten dieser Sicherheitsbewertung werden maßgeblich zu dem hohen Verkaufspreis für solche Steuerungen beitragen, vor allem 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 in-

tegriert 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.

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

8.1 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:

$$q_c = \frac{100 \times Q_c}{H_{i,f}} \quad (8.1)$$

$$Q_c = \frac{335 \times B \times A}{100} \quad (8.2)$$

Wobei:

q_c Wirkungsgradverluste durch Rückstände in %,

Q_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 abgeseibte (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 $\leq 3,15$ mm, rechts: Partikel $> 3,15$ mm



Abbildung 43: Gesiebte Rückstände nach 8 Abbränden mit Steuerung Schmid SMR. Links: Partikel $\leq 3,15$ 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. [27] berechnet:

$$H_{O_{\text{Rückstand}}} = 0,3491 \times C + 1,1783 \times H + 0,1005 \times S - 0,0151 \times N - 0,1034 \times O - 0,0211 \times A \quad (8.3)$$

$$H_{U_{\text{Rückstand}}} = H_{O_{\text{Rückstand}}} \times \left(1 - \frac{WG}{100}\right) - 2,447 \times \frac{WG}{100} - 2,447 \times \frac{H}{100} \times 9,01 \times \left(1 - \frac{WG}{100}\right) \quad (8.4)$$

$$q_c = \frac{H_{U_{\text{Rückstand}}} \times m_{\text{Rückstand}}}{H_{U_{\text{Brennstoff}}} \times m_{\text{Brennstoff}}} \times 100 \quad (8.5)$$

Wobei:

$H_{O_{\text{Rückstand}}}$ 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),

O der Sauerstoffgehalt in m-% (trocken),

A der Aschegehalt in m-% (trocken),

$H_{U_{\text{Rückstand}}}$ der untere Heizwert des Rückstands in MJ/kg (feucht),

WG der Wassergehalt in m-% (feucht),

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

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

$m_{\text{Brennstoff}}$ 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:

$$q_c = \frac{(m_{\text{Rückstand}} - A \times m_{\text{Brennstoff}}) \times H_{u_c}}{m_{\text{Brennstoff}} \times H_{u_{\text{Brennstoff}}}} \quad (8.6)$$

Wobei:

H_{uc} 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 (n. n. = nicht nachweisbar)*

Bestimmung	Einheit	Brennstoff (Buche)	Holzkohle (d. h. Partikel > 3,15 mm)	Asche (d. h. Partikel < 3,15 mm)
C	m-% (trocken)	48,88	74,85	12,20
H	m-% (trocken)	6,10	1,45	0,10
N	m-% (trocken)	0,09	0,44	0,06
S	m-% (trocken)	0,01	0,08	0,11
Cl	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	0,00
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	n. n.

Die Elementarzusammensetzung des Brennstoffs, der untersuchten Holzkohleproben sowie der bestimmte und der errechnete Heizwert sind in Tabelle 13 aufgelistet. Der Heizwert der abgeseibten Asche konnte im Bombenkalorimeter 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 und Tabelle 15 finden 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 ($q_{c,u}$). Die nach GAUR et al. (q_c) oder der vereinfachte TFZ Methode (q_c) 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 (8.1) noch aus der Norm für Dauerbrandöfen mit Kohle als Brennstoff (DIN 18880-1 [11] von 1991) stammt und für Holzbrennstoffe daher nicht geeignet zu sein scheint.

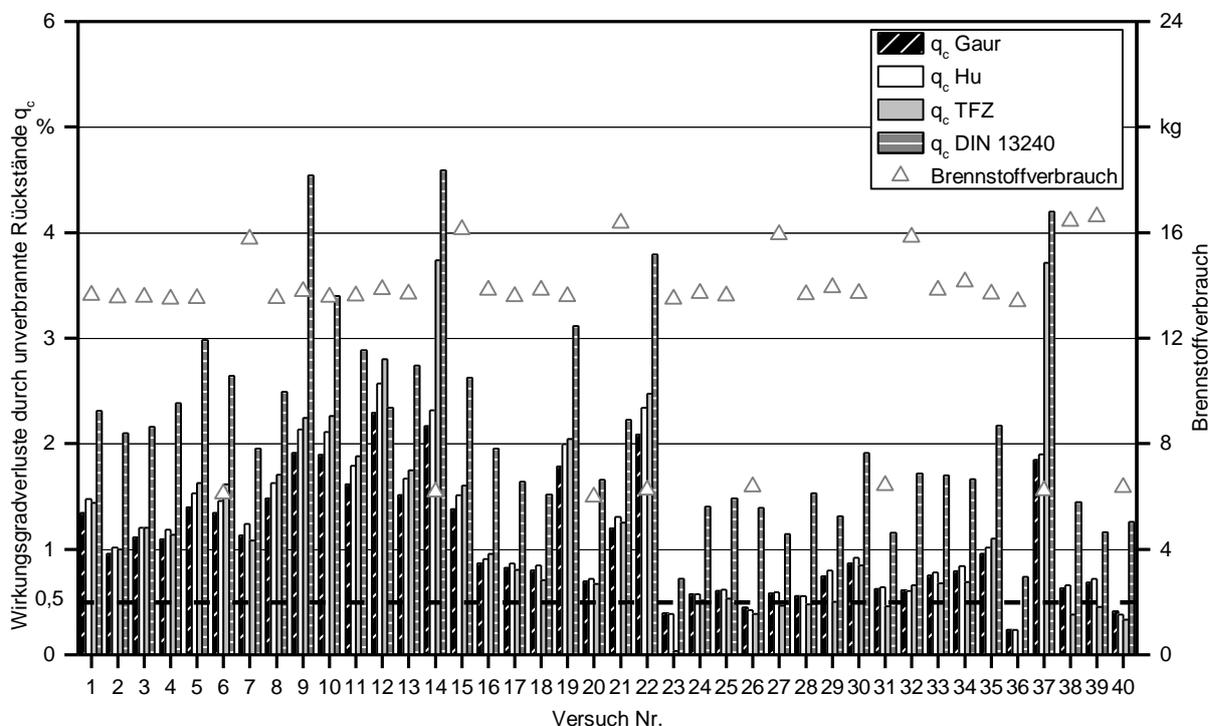


Abbildung 44: Grafischer Vergleich der Berechnungsmethoden für die Verluste aus unvollständig verbrannten Rückständen. Die gestrichelte Linie bei 0,5 % zeigt den nach DIN EN 13240 pauschal abziehbaren Wert für naturbelassenes Holz

Vergleicht man die Menge an anfallender Holzkohle in Tabelle 14 und Tabelle 15, 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 7, 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 15: Nr. 23 und 24).

Tabelle 14: Tabellarischer Vergleich der Asche und Holzkohlemengen nach den Versuchen sowie der Glühverluste und der eingesetzten Brennstoffmenge

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	100,0	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	91,0	13,7
14	Schmid SMR Ofensteuerung, Wärmeverlustbestimmung	67	81	91,0	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	80,0	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	6,0
21	K&W Compact Ofensteuerung, Überlast	73	122	88,8	16,4
22	K+W automatische Zuluftklappe Nachlegen nach CO ₂ Kriterium	28	83	100,9	6,3

Tabelle 15: Tabellarischer Vergleich der Asche und Holzkohlemengen nach den Versuchen sowie der Glühverluste und der eingesetzten Brennstoffmenge (Fortsetzung)

Nr.	Bezeichnung Versuch	Asche [g]	Holzkohle [g]	Glühverlust [%]	Brennstoff [kg]
23	Naturzug, Luftklappen in letzter Stellung verblieben	51	30	56,7	13,5
24	Naturzug, Luftklappen geschlossen	69	45	80,3	13,7
25	Naturzug, Luftklappen in letzter Stellung verblieben	66	48	84,0	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	68,0	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

8.2 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, Tabelle 15 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 beispielsweise mit dem Wirkungsgrad des Ofens berechnet werden. Somit würde der darstellbare Wirkungsgrad nochmals etwas ansteigen (vgl. Vorschlag in Formel (8.7)).

$$\eta = 100 - (q_a + q_b - q_c * \eta_{charcoal} + q_{cool}) \quad (8.7)$$

9 Einfluss des Förderdrucks auf Wirkungsgrad und Emissionen

Zusätzlich zur Untersuchung der Zugbegrenzer (siehe Abschnitt 7) wurden Ergebnisse aus vorherigen Projekten („beReal“ [43], TFZ-Bericht 36 [29]) zum Einfluss des Förderdrucks auf den Wirkungsgrad und die Schadstoffemissionen zusammengefasst. Dabei wurden die gasförmigen und Gesamtstaubemissionen sowie der Wirkungsgrad von drei verschiedenen Kaminöfen bei Förderdrücken von 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa gemessen.

9.1 Einfluss des Förderdrucks auf Emissionen

Hinsichtlich der CO-Emissionen (Abbildung 45) ist je nach Feuerung ein gegenläufiger Trend zum steigenden Förderdruck zu beobachten. So steigen beispielsweise bei Kaminöfen A die CO-Emissionen mit steigendem Förderdruck von 1.597 mg/Nm^3 bis auf 2.103 mg/Nm^3 um rund 24 % an, während sie bei Ofen B (-25 %) und C (-45 %) mit steigendem Zug abnehmen. Dies deckt sich auch mit den unter Abschnitt 7 beobachteten Ergebnissen bezüglich der CO-Emissionen am Naturzug (ca. 24 Pa), die für den verwendeten Kaminofen (Kaminofen A) ebenfalls niedriger lagen, als beim geregelten Zug bei 12 Pa.

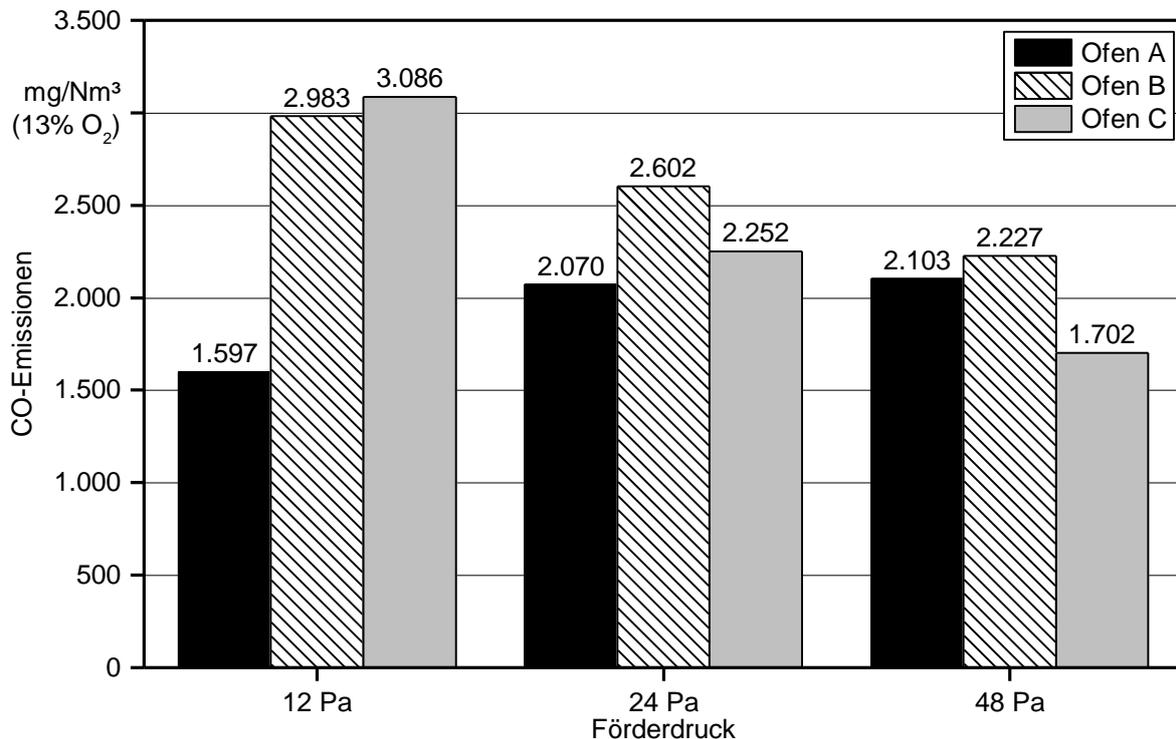


Abbildung 45: Vergleich der CO-Emissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [43])

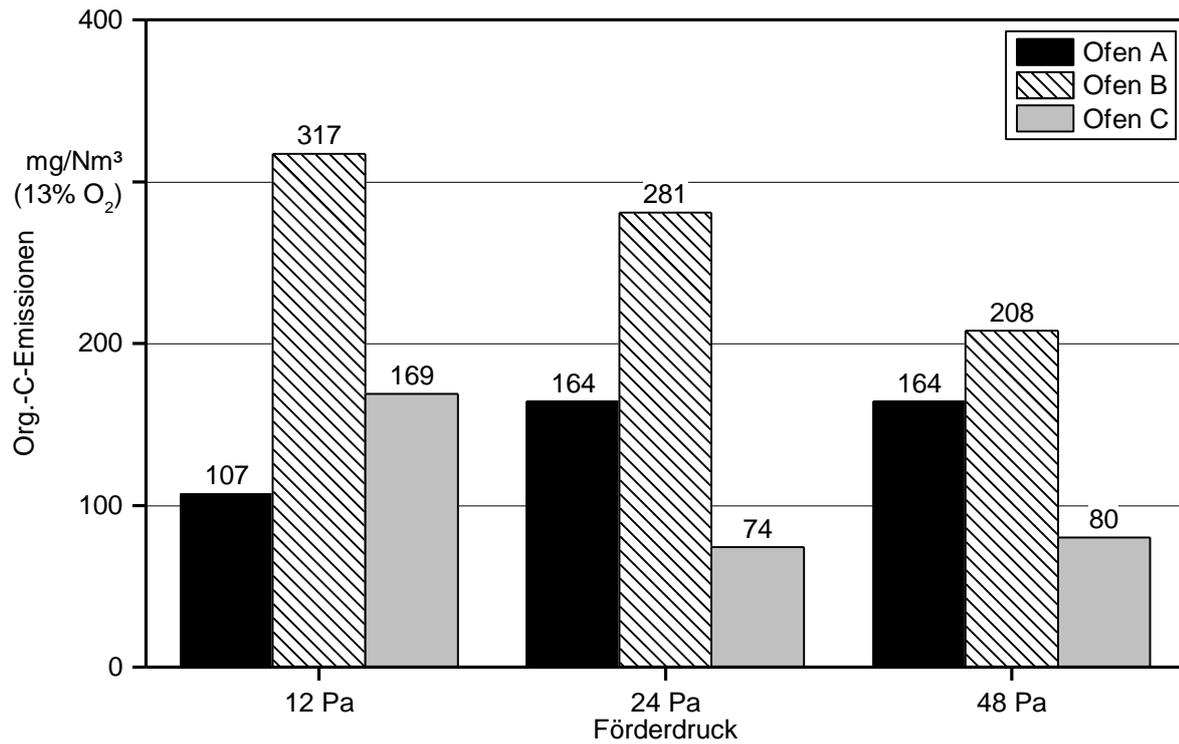


Abbildung 46: Vergleich der Org.-C-Emissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [43])

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.

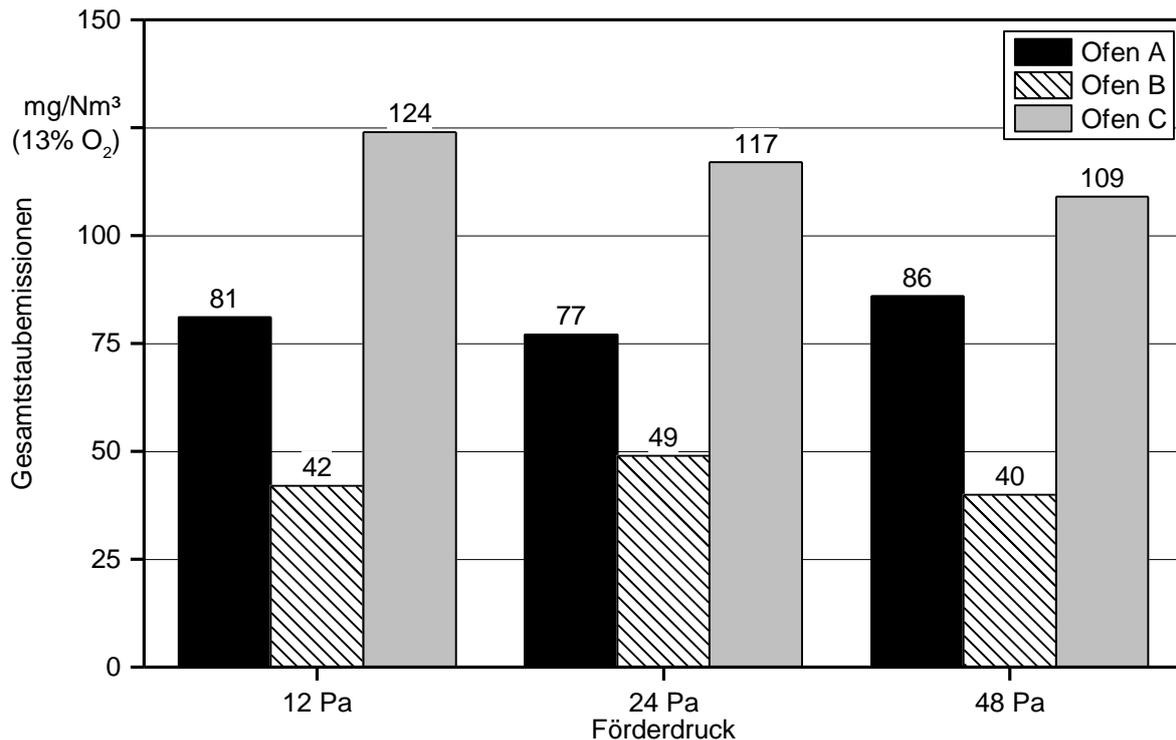


Abbildung 47: Vergleich der Gesamtstaubemissionen gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa Förderdruck (nach [43])

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

9.2 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 Förderdruck 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 7.2 der Wirkungsgrad bei der Messung am Naturzug im Vergleich zu der Messung am geregelten Zug ab.

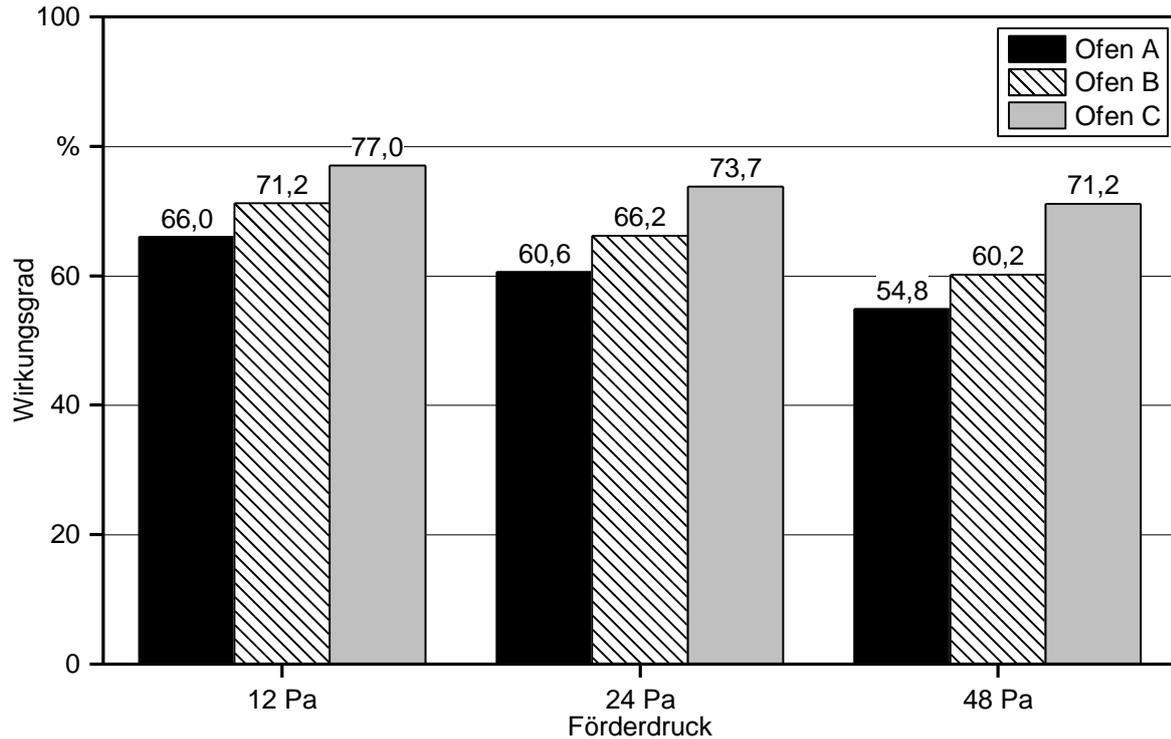


Abbildung 48: Vergleich des Wirkungsgrads gemessen an drei unterschiedlichen Kaminöfen bei 12 Pa, 24 Pa und 48 Pa (nach [43])

9.3 Zusammenfassende Bewertung des Einflusses des Förderdrucks auf Wirkungsgrad und Emissionen

Zusammenfassend ist zu sagen, dass bezüglich der Emissionen keine eindeutige Empfehlung für einen optimalen Förderdruck möglich ist, da sich diese je nach Kaminöfen bei Erhöhung des Förderdrucks entweder reduzieren oder erhöhen. Hinsichtlich des Wirkungsgrads lässt sich allerdings eine eindeutige Abnahme mit steigendem Förderdruck feststellen, die offenbar auch nicht ofenspezifisch ist (siehe auch Abschnitt 7.3).

Zusammenfassung

Ziel der hier beschriebenen Arbeitspakete, die am Technologie und Förderzentrum (TFZ) durchgeführt wurden, war es, bestimmte Einflüsse und Ausstattungsmerkmale für moderne Kaminöfen hinsichtlich ihrer Emissionen, ihres Wirkungsgrads und ihrer Stillstandverluste 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 am TFZ auf nachrüstbaren Lösungsansätzen. In den Ofen integrierte technische Maßnahmen sowie die CFD-basierte Neuentwicklung 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 Stoves 2020“ [36] wiedergegeben.

Schaumkeramiken und Katalysatoren

Die Verwendung eines nicht katalytischen Schaumkeramikelements führte zu keiner Verbesserung hinsichtlich des Emissionsverhaltens 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. Vor allem kam es zu einer CO-Minderung. Dieser Effekt nahm mit zunehmender Zahl von Abbränden stark ab. Einer solchen Abnahme kann teilweise durch regelmäßige Reinigung des Katalysators entgegengewirkt werden. Hier sollten vonseiten 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 Projekts nicht untersucht wurde. Der möglicherweise dauerhaften Abnahme der Aktivität des Katalysators durch Katalysatorgifte könnte eventuell durch andere Mischungen der verwendeten Edelmetalle bzw. durch andere Katalysatorsubstanzen entgegengewirkt werden. Außerdem sollte in Feldmessungen über eine oder mehrere Heizperioden abgeklärt werden, inwieweit die dauerhafte Deaktivierung des Katalysators vorschreitet und inwieweit 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.

Stillstandverluste

Die im Rahmen dieses Projekts an einem 8 kW Kaminofen quantifizierten Stillstandverluste (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 ($< 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$), aber auch bei allen übrigen Gebäuden, in denen besondere Effizienzvorgaben bestehen, sollten Stillstandverluste 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 angesichts der derzeitigen Brennstoffpreise 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 „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 Gesamtstaubemissionen kommt es jedoch nicht automatisch zu Verbesserungen. Sie können auch bei guter Adaption der Steuerungsparameter an den Öfen leicht erhöht sein, wenn man einen optimalen, fachkundigen, manuellen Prüfstandsbetrieb zugrunde legt. In der Praxis liegen die Emissionen aber erfahrungsgemäß deutlich höher als auf dem Prüfstand [29; 43], was sich allerdings in Prüfstandsmessungen kaum vollständig darstellen lässt, obgleich die hier aufgeführten Messergebnisse auf einer praxisnahen Prüfmethode basieren. Auch können bei Prüfstandsmessungen 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 Nutzereinfluss – ausgehend von einem schlechteren Niveau als am Prüfstand – deutlich abmindert und in den meisten Fällen eine 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 Stillstandverluste auf ein Minimum reduziert werden, wenn die Klappe der Steuerung dicht schließt. Je nach Anschaffungspreis für eine solche Steuerung liegt die Amortisationszeit zwischen sechs Jahren (TATAREK, wenn Klappe dicht schließend wäre) und 25 Jahren (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) 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 15 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 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.

Inwieweit technische Funktionen zukünftiger Öfen langfristig 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 Minderungspotenzial 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 elektrostatischer Partikelabscheider 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, Org.-C) 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.

Abstract

Log wood stoves contribute significantly to renewable heat production in Europe. But new efficiency and emission requirements are challenging. This report reflects the findings of the investigations carried out at the Technology- and Support Centre within the Project “Wood Stoves 2020”, which aimed at investigating and improving complete systems of 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. Both, thermal efficiency and flue gas emissions were in the focus.

Four temperature based retrofit automated control systems were evaluated which consistently improved stove performance compared to manual operation of the same stove (fixed air flow). Thus the efficiency could be raised by about 1.5 to 4.6 %-points while gaseous emissions were reduced by about 40 to 56 %. However, particle emissions remained largely unchanged or were comparable to good manual stove operation.

The effect of foam ceramic “filtering” inserts in log wood stoves as well as their replacement by a catalyst insert was experimentally evaluated. The assumption that PM reduction could also be achieved by using uncoated (non-catalytic) foam ceramic filtering elements in stoves – as it was recently advertised by several stove manufacturers – couldn’t be proven. But when the foam ceramic was replaced by a catalyst insert of the same flowing properties, a reduction of 43 % for CO- and about 21 % for non-CH₄-emissions was achieved. Regarding particle, NO_x and CH₄-emissions no reduction was observed.

First tests over 10 full days of stove operation showed a significant deactivation of the catalytic effect which could not be regenerated by simply cleaning with a brush. However, tests over a whole heating period would be needed for a sound evaluation of long-term performance of catalysts for wood stoves.

The influence of chimney draught (too low or too high) was also investigated. A draught stabilizer was tested and evaluated. It enabled a largely increased efficiency by approx. 10 %-points, but at the same time it also slightly raised gaseous emissions (+23 %) and PM emissions (+14 %).

To evaluate chances for 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 of air-tight flaps or when automated combustion air control units are applied, which provide this function, too. But with the current prices of automatically closing air flaps and retrofit controllers the pay-off period would be still too high (approx. 14 to 23 years).

All technologies investigated were comprehensively tested using a particularly developed and harmonized testing method (the “beReal“ method) which was closer to real life operation than today’s type testing standards. Thus, all achieved results and performances can be also interpreted as directly achievable in field applications.

Quellenverzeichnis

- [1] AIGENBAUER, S.; MOSER, W.; SCHMIDL, C. (2011): Endbericht Neue Öfen 2020. Der Ofen der Zukunft – Maßnahmen zur Umsetzung des höchstmöglichen Standes der Technik von Öfen für stückige Holzbrennstoffe. URL: https://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/818948_Neue_Oefen_2020_Publizierbarer_Endbericht.pdf (Stand: 04.07.2017)
- [2] ALEYSA, M.; LEISTNER, P. (2016): Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens in biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen durch den Einsatz spezieller Einbauten. Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt gefördert von der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) (FKZ: 13NR 104), 162 Seiten
- [3] BINDIG, R.; BUTT, S.; HARTMANN, I.; MATTHES, M.; THIEL, C. (2012): Application of Heterogeneous Catalysis in Small-Scale Biomass Combustion Systems. *Catalysts*, Jg. 2, Nr. 2, S. 223-243
- [4] BRUHN, K. (2018): Scheitholzpreise. TFZ-Brennstoffpreisindex. Technologie- und Förderzentrum. URL: http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/merkblatt_brennholzpreisindex.pdf (Stand: 14.07.2017)
- [5] 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*, Jg. 61, Teil I, Nr. 4, S.38–56
- [6] 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/biogene-festbrennstoffe/brennstoffe/scheitholz/422-heizwert-in-abhaengigkeit-von-holzart-und-wassergehalt> (Stand: 12.07.2017)
- [7] CANRÖ, J. (1996): Catalytic abatement of emissions from small-scale combustion of wood. *Fuel*, Jg. 75, Nr. 8, S. 959–965
- [8] CARNÖ, J.; FERRANDON, M.; BJÖRNBOM, E.; JÄRÅS, S. (1997): Mixed manganese oxide/platinum catalysts for total oxidation of model gas from wood boilers. *Applied Catalysis A: General*, Jg.155, Nr. 2, S. 265–281
- [9] 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)
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (2017): DIBt - Zulassungen - Verfahren Europa. Deutsches Institut für Bautechnik. URL: <https://www.dibt.de/de/Zulassungen/ETA.html> (Stand: 12.07.2017)
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (1991): DIN 18880-1: Dauerbrandherde für feste Brennstoffe - Verfeuerung von Kohleprodukten - Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 12 Seiten
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2005): DIN EN 13240: Raumheizer für feste Brennstoffe. 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). 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. 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. 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. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 18 Seiten
- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16967: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung von Hauptelementen - Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti (ISO 16967:2015). Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16968: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung von Spurenelementen. 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. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 20 Seiten
- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18122: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes. 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. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 12 Seiten
- [22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 14780: Biogene Festbrennstoffe – Verfahren zur Probenherstellung. 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] DURAND, A.; GÖTZ, T.; THEMA, J.; DITTUS, F.; HÜBSCHMANN, M. (2014): EU UltraLowDust Project - Final Information Material and Policy Recommendations. European Institute for Energy Research; Graz University of Technology; Technologie- und Förderzentrum; Wuppertal Institute for Climate, Environment, Energy BIOS Bioenergiesysteme GmbH. URL: http://www.ultralowdust.eu/fileadmin/user_upload/public/EU_UltraLowDust_Final_Information_Material.pdf (Stand: 26.06.2017)
- [25] FERRANDON, M.; BERG, M.; BJÖRNBOM, E. (1999): Thermal stability of metal-supported catalysts for reduction of cold-start emissions in a wood-fired domestic boiler. *Catalysis Today*, Jg. 53, Nr. 4, S. 647–659

- [26] FERRANDON, M.; BJÖRNBOM, E. (1999): Deactivation in a wood-stove of catalysts for total oxidation. In: Delmon, B.; Froment, G. F. (Eds.): Catalyst deactivation 1999, Proceedings of the 8th International Symposium. Studies in Surface Science and Catalysis, Nr. 126. Amsterdam: Elsevier BV, S. 423-426, ISBN 9780444502131
- [27] GAUR, S.; REED, T. B. (1998): Thermal data for natural and synthetic fuels. New York, Basel, Hong Kong: Marcel Dekker, 280 Seiten, ISBN 9780824700706
- [28] HARTMANN, H. (2013): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Leitfaden. 3., vollst. überarb. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 192 Seiten, ISBN 9783000110412
- [29] HARTMANN, H.; SCHÖN, C. (2014): Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen. Berichte aus dem TFZ, Nr. 36. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 173 Seiten, ISSN 1614-1008
- [30] HARTMANN, H.; SCHÖN, C.; TUROWSKI, P. (2015): Richtig heizen. Der Betrieb von Kaminöfen. TFZ-Wissen, Nr. 1. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 31 Seiten
- [31] KUHRMANN, H.; RAWE, R. (2004): Energieverluste von Gebäuden infolge Luftströmungen durch Abgasanlagen. Einsparungen durch Abgasklappen. Diplomarbeit. Gelsenkirchen. Fachhochschule Gelsenkirchen
- [32] KULMALA, K. (2014): Particle and gaseous emissions from modern masonry heater. Master of Science thesis. Finland. Kuopio: University of Eastern Finland, Faculty of Science and Forestry, Department of Environmental Science, 59 Seiten
- [33] KUTZNER + WEBER GMBH (2017): Komponenten für die Abgas- und Heizungstechnik. Preisliste gültig ab 01.07.2017. URL: http://kutzner-weber.de/fileadmin/kw_images/k+w_pdf/KW_PL_de_web.pdf (Stand: 13.07.2017)
- [34] LI, Q.; JIANG, J.; QI, J.; DENG, J.; YANG, D.; WU, J.; DUAN, L.; HAO, J. (2016): Improving the Energy Efficiency of Stoves To Reduce Pollutant Emissions from Household Solid Fuel Combustion in China, Environmental Science & Technology Letters, Jg. 3, Nr. 10, S. 369–374
- [35] MACK, R.; HARTMANN, H. (2016): Standing losses via chimney when using log wood stoves. In: Faaij, A.; Baxter, D.; Grassi, A.; Helm, P. (Hrsg.): Setting the course for a biobased economy. Extracted from the Proceedings of the International Conference. 24th European Biomass Conference & Exhibition. RAI Amsterdam Exhibition and Congress Centre, Amsterdam, The Netherlands, 6-9 June. Florence: ETA-Florence Renewable Energies; WIP-Renewable Energies, S. 646-650, ISBN 9788889407165
- [36] MACK, R.; HARTMANN, H.; MANDL, C.; OBERNBERGER, I.; SCHÜßLER, I.; VOLZ, F.; FURBORG, J.; ILLERUP, J. (2017): WoodStoves2020: Development of Next Generation and Clean Wood Stoves - Final Project Report, Date: August 2017. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 60 Seiten

- [37] MANDL, C.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I.; MACK, R.; HARTMANN, H.; SCHÜßLER, I. (2017): Project ERA-NET Bioenergy “Stove 2020” - Report on catalysts and foam ceramics, Date: June 2017. Graz; Göteborg; Straubing: BIOS Bioenergiesysteme GmbH, RISE Research Institutes of Sweden AB, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 313 Seiten
- [38] NUSSBAUMER, T.; LAUBER, A. (2010): Formation Mechanisms and Physical Properties of Particles from Wood Combustion for Design and Operation of Electrostatic Precipitators. In: Spitzer, J., Dallemand, J. F., Baxter, D., Ossenbrink, H., Grassi, A., Helm, P. (Hrsg.) (2010): 18th European Biomass Conference and Exhibition - From Research to Industry and Markets, Proceedings of the European Conference, held in Lyon, France, 3 - 7 May 2010. Florence, Italy: ETA-Florence Renewable Energies, WIP-Renewable Energies, S. 1219-1227, ISBN 978-88-89407-56-5
- [39] OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; SIPPULA, O.; VIRÉN, A.; HARTMANN, H.; SCHÖN, C.; TUROWSKI, P.; BOMAN, C.; NIKLASSON, F.; BÄFVER, L.; FAGERSTRÖM, E.; ÖHMAN, M.; NÄZELIUS, I.-L.; BOCIAN, P.; GOLEC, T. (2012): ERA-NET Bioenergy Project FutureBioTec - Final Report „Future low emission biomass combustion systems“. Graz University of Technology; Technologie- und Förderzentrum; Bioenergy 2020+; University of Eastern Finland; Umeå University; SP Technical Research Institute of Sweden; Luleå University of Technology; Institute of Power Engineering. URL: <http://futurebiotec.bioenergy2020.eu/files/FutureBioTec-FinalReport.pdf> (Stand: 26.06.2017)
- [40] OBERNBERGER, I.; HARTMANN, H.; MANDL, C.; MACK, R.; VOLZ, F.; FURBORG, J.; SCHÜßLER, I. (2017): Guidelines for Low Emission and High Efficiency Stove Concepts. Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project “Woodstoves 2020” Development of Next Generation and Clean Wood Stoves. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 33 Seiten
- [41] OBERNBERGER, I.; MANDL, C. (2017): Guidelines for heat storage units based on Phase Change Materials (PCM). Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project “Woodstoves 2020” - Development of Next Generation and Clean Wood Stoves. Graz: BIOS Bioenergiesysteme GmbH, 21 Seiten
- [42] OBERNBERGER, I.; MANDL, C.; HARTMANN, H.; MACK, R.; SCHÜßLER, I.; FURBORG, J.; ILLERUP, J.; VOLZ, F. (2017): Guidelines for automated control systems for stoves. Report within the scope of the ERA-NET Bioenergy Project “Woodstoves 2020” - Development of Next Generation and Clean Wood Stoves. Graz: BIOS Bioenergiesysteme GmbH, 28 Seiten
- [43] 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. *Renewable Energy*, Jg. 105, S. 547–560

- [44] REICHERT, G.; HARTMANN, H.; HASLINGER, W.; OEHLER, H.; PELZ, S.; SCHMIDL, C.; SCHWABL, M.; STRESSLER, H.; STURMLECHNER, R.; WOEHLE, M.; HOCHENAUER, C. (2016): beReal - Development of a new test method for firewood room heaters reflecting real life operation. In: FAAIJ, A.; BAXTER, D.; GRASSI, A.; HELM, P. (Hrsg.): Setting the course for a biobased economy. Extracted from the Proceedings of the International Conference. 24th European Biomass Conference & Exhibition. RAI Amsterdam Exhibition and Congress Centre, Amsterdam, The Netherlands, 6-9 June. Florence: ETA-Florence Renewable Energies; WIP-Renewable Energies, S. 382-387, ISBN 9788889407165
- [45] RÖNNBÄCK, M.; PERSSON HENRIK; JESPERSEN, M. G.; HINNERSKOV JENSEN, J. (2016): Deliverable D7.1 - Documentation and evaluation of field data demonstration. Borås, Sweden: SP Technical Research Institute of Sweden, URL: http://www.bereal-project.eu/uploads/1/3/4/9/13495461/d7.1_documentation_and_evaluation_of_field_data_demonstration_final_1.pdf, 36 Seiten
- [46] SALMANG, H.; SCHOLZE, H. (1982): Keramik. Teil 1: Allgemeine Grundlagen und wichtige Eigenschaften. 6., verb. u. erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 308 Seiten, e-Book ISBN 3642474934
- [47] SCHLICHTER M. (2017): Aktuelle Erfahrungen aus der Überwachung von Kleinf Feuerungsanlagen. In: TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (TFZ) (Hrsg.) (2017): Programm der 21. Sitzung des Arbeitskreises Holzfeuerung. Schwerpunkt Einzelraumfeuerungen, Schwerpunkt Zentralheizungen., Schulungs- und Ausbildungszentrum (SAZ), Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing, 17. Mai 2017. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), s. p.
- [48] SCHÜßLER, I.; MANDL, C.; OBERNBERGER, I. (2017): ERA-NET Wood Stoves 2020 - Sensor screening and evaluation. Gas sensors for automated stove control systems, Date: 10.08.2017. Borås, Sweden: SP Technical Research Institute of Sweden, 118 Seiten
- [49] TATAREK: BEDIENUNGSANLEITUNG. KAMIN OS (RT-08G-OS) Verbrennungsoptimierer. URL: http://tatarek.com.pl/files/img/de_bedienungsanweisung_rt08gos.pdf (Stand: 31.07.2017), 8 Seiten
- [50] TRUCKENBRODT, E. A. (2008): Fluidmechanik. Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. Klassiker der Technik. Veränd. Nachdr. d. 4., erg. Aufl. 1999. Berlin, Heidelberg: Springer, 364 Seiten, ISBN 3540790179
- [51] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.°V. (VDI) (2006): Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbelaugung. VDI-Richtlinien; VDI 2066, Blatt 1. Berlin: Beuth, 111 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. Applied Energy 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. Energy Fuels, Jg. 31, Nr. 7, S. 7562–7571

- [54] ZAWADA, M.; STAROSTKA-PATYK, M. (2016): Energy Efficiency in the Context of Low-stack Emissions Reduction on the Example of the City of Czestochowa. Transportation Research Procedia, Jg.16, S. 587–597

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors

15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse aus bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufen I und II
32	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
45	ExpResBio – Methoden
46	Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
47	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
48	Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayेरische Anbaubedingungen
49	Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
50	Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode
51	Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor

52	Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln
53	Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
54	Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
55	Lagerung von Holzhackschnitzeln
56	Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
57	Optimierungspotentiale bei Kaminöfen - Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste

