

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP

**VERBESSERUNG DES VERBRENNUNGS- UND
EMISSIONSVERHALTENS IN BIOMASSEBETRIEBENEN
EINZELRAUMFEUERUNGSANLAGEN DURCH DEN EINSATZ
SPEZIELLER EINBAUTEN**

**ABSCHLUSSBERICHT ÜBER EIN FORSCHUNGSPROJEKT GEFÖRDERT VON DER
FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FKZ: 13NR104)**

Dr.-Ing. Mohammad Aleyssa

Prof. Dr. Philip Leistner

Stuttgart, 30. Juni 2016

Vorwort

Der vorliegende Abschlussbericht zum Thema Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens in biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen durch den Einsatz spezieller Einbauten entstand im Fachgebiet Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP im Rahmen des Projekts mit dem Förderkennzeichen FKZ: 13NR104 von August 2014 bis Februar 2016.

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz BMELV und der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe FNR für die administrative und finanzielle Unterstützung dieses Projekts. Ein besonderer Dank geht an Herrn Dr.-Ing. Andrej Stanev für die wertvolle organisatorische Begleitung des Projekts.

Danken möchten wir auch den Industriepartnern, Firma Wodtke GmbH, Firma Mayr Heiztechnik und der Firma rondo Ringkachelofen GmbH, die uns über das Projekt begleitet und uns sowohl fachlich als auch technisch durch die Bereitstellung der Prototypen der Versuchsfeuerstätten unterstützt haben.

Ferner gilt unser Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Diplomanden und Doktoranden des Fachgebiets Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP für die kooperative und produktive Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Ziele	10
2	Inhalt des Projekts	13
3	Stand der Wissenschaft und der Technik	15
3.1	Immissionsschutzrechtliche Anforderungen an Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland und Europa	15
3.2	Grundlagen zur Verbrennung und Schadstoffbildung	19
3.2.1	Thermochemische Umwandlung fester Brennstoffe	19
3.2.2	Schadstoffbildung und primäre Reduktionsmöglichkeiten	21
3.3	Überblick über Einzelraumfeuerungsanlagen und ihre betrieblichen Besonderheiten	26
3.3.1	Betriebliche und konzeptionelle Besonderheiten von Einzelraumfeuerungsanlagen	26
3.3.2	Einfluss des Schornsteins auf den Betrieb der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen in der Praxis	31
3.3.3	Problematiken in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen	35
3.4	Integrierbare Technologien zur Abgasbehandlung in Einzelraumfeuerungsanlagen	39
3.4.1	Filtrationsverfahren	39
3.4.2	Oxidationsverfahren	40
3.4.3	Technische Methode zur Bewertung der integrierten Technologien zum Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen	43
4	Verfahrenstechnische Grundlage der Einbautentechnik	47
4.1	Einbauten und technischer Aufbau des Einbautenmoduls	47
4.2	Funktionsprinzip der Einbautentechnik	49
4.3	Vorteil und Besonderheit der Einbautentechnik	50
4.4	Verfahrenstechnische Kenngrößen zur Auslegung der Einbautentechnik	52
4.5	Auswahl von Einbauten zum Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen	55
4.6	Auslegung von Einbautentechnik	58
4.6.1	Erforderliche Angaben zur Auslegungen der Einbautentechnik	58
4.6.2	Charakteristische Größe zur Auslegung der Einbautentechnik	59
4.6.3	Berechnung und Dimensionierung des Einbautenmoduls	64
4.6.4	Ermittlung des Druckverlusts	68
4.6.5	Aerodynamisches Verhalten	70
4.6.6	Auslegungsbeispiel	71

5	Technische Einrichtungen zur Versuchsdurchführung	74
5.1	Versuchsmesseinrichtung	74
5.1.1	Versuchs- und Prüfstand	74
5.1.2	Abgasanalyse	75
5.1.3	Staubzählverfahren zur Messung von Feinstäuben (5 nm bis 350 nm)	76
5.2	Versuchsverbrennungsanlagen (Einzelraumfeuerungsanlagen)	77
5.2.1	Versuchsverbrennungsanlagen mit einer schnellen Wärmeabgabe im Aufstellraum, freistehender Raumheizer nach DIN EN 13240	77
5.2.2	Versuchsverbrennungsanlagen mit einer langsamen Wärmeabgabe im Aufstellraum, Speicherfeuerstätte nach DIN EN 15250	79
6	Experimentelle Untersuchungen zur Einbautentechnik	82
6.1	Experimentelle Untersuchungen des Raumheizers gemäß DIN EN 13240 mit und ohne Einbauten	84
6.1.1	Versuchsplanung, Raumheizer gemäß DIN EN 13240	84
6.1.2	Untersuchungsergebnisse des Raumheizers gemäß DIN EN 13240	85
6.2	Experimentelle Untersuchungen zur Speicherfeuerstätte gemäß DIN EN 15250 mit und ohne Einbauten	121
6.2.1	Versuchsplan, Speicherfeuerstätte gemäß DIN EN 15250	121
6.2.2	Untersuchungsergebnisse der Speicherfeuerstätte gemäß DIN EN 15250	122
7	Umsetzbarkeit der Einbautentechnik in der Praxis	146
7.1	Umsetzbarkeit der Einbautentechnik aus technischer und normativer Sicht	147
7.2	Umsetzbarkeit der Einbautentechnik aus wirtschaftlicher Sicht	148
7.3	Umsetzbarkeit der Einbautentechnik aus ökologischer Sicht	149
8	Verwertung der erzielten Ergebnisse	150
9	Entwicklung neuartiger Einbauten	152
	Zusammenfassung und Ausblick/ Summary and Outlook	154

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vereinfachte Form für die thermische Umwandlung biogener Festbrennstoffe mit der Schadstoffbildung.	22
Abbildung 2:	Betriebliche, verbrennungstechnische und konzeptionelle Besonderheiten von Einzelraumfeuerungsanlagen hinsichtlich der Auslegung von integrierten Technologien zur Schadstoffminderung.	27
Abbildung 3:	Druck- und Temperaturbedingungen nach DIN EN 13384 (links), Versuchsaufbau des mehrfach belegten Luft-Abgas-Schornsteins LAS (rechts), sowie die Leistungskenndaten der verwendeten Feuerstätten.....	32
Abbildung 4:	Parameter für die Verbrennung.....	36
Abbildung 5:	Schaumkeramik-Filterplatten im Neuzustand (links), nach zwei Betriebstagen (ca. 14 h) (rechts).....	40
Abbildung 6:	Katalysator aus beschichtetem Granulat nach drei Betriebstagen (ca. 21 h).....	41
Abbildung 7:	Kriterien zur technischen Bewertung von Technologien zur Integration in Einzelraumfeuerungsanlagen.	43
Abbildung 8:	Keramische und metallische Einbauten (Füllkörper) der Firma Raschig GmbH.....	47
Abbildung 9:	Technischer Aufbau des Einbautenmoduls (links), Vertikalschnitt im Einbautenmodul (rechts).....	48
Abbildung 10:	Bildung von Agglomeraten im Einbautenmodul beim Einsatz in Kleinf Feuerungsanlagen.	50
Abbildung 11:	Abmessungsbezeichnung für ein Einbautenmodul.....	61
Abbildung 12:	Verdünnungstunnel zur langzeitigen Feinstaubzählung in Anlehnung an die norwegische Norm NS 3058-2.....	76
Abbildung 13:	Verwendete Einzelraumfeuerungsanlage gemäß DIN EN 13240, Prototyp eines freistehenden Raumheizers der Firma Wodtke GmbH.	78
Abbildung 14:	Verwendete Einzelraumfeuerungsanlage gemäß DIN EN 15250, Prototyp einer Speicherfeuerstätte der Firma Rondo Kachelofen GmbH.	80
Abbildung 15:	Praktisches Anwendungsbeispiel der Einbautentechnik von der Firma Schmid und Camina [k & L Magazin 2/2016].....	151
Abbildung 16:	Prototyp des Kamineinsatzes der Firma Mayr Heiz- und Energietechnik.	151
Abbildung 17:	Beispiel für einen Zylo-Turbo-Einbau (links), Innengussform (rechts).....	152
Abbildung 18:	Einbautenmodul aus einem einzigen Zylo-Turbo-Einbau mit integrierter Abgasprallplatte und Abgasleitkegel, Dimensionen sind in Millimeter angegeben.....	153

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1:	Verläufe mittlerer Temperaturen im Feuerraum sowie in der Abgasanlage (Tripelpunkttemperatur) einer handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlage im Nennlastbetrieb.....	30
Diagramm 2:	Feuerraum- und Abgastemperaturen, Verweilzeit und Sauerstoff bei einer handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß DIN EN 13240.	37
Diagramm 3:	Reduktionsgrade von Kohlenstoffmonoxid [Aleysa et al. 2015].	54
Diagramm 4:	Reduktionsgrad von Propan [Aleysa et al. 2015].	54
Diagramm 5:	Dichte des Abgases bei der Verbrennung von weichem und hartem Holz in Einzelraumfeuerungsanlagen.	69
Diagramm 6:	Druckverlust der keramischen Pall-Ringe 50 mm im Neuzustand.	70
Diagramm 7:	Druckverlust über mehrere Betriebstage mit keramischen Einbauten.	86
Diagramm 8:	Druckverlust über mehrere Betriebstage mit metallischen Einbauten.	86
Diagramm 9:	Temperaturverlauf ohne und mit keramischen Einbauten beim Betrieb des freistehenden Raumheizers.	88
Diagramm 10:	Temperaturverlauf im Einbautenmodul (dreistufig, keramische Einbauten).	89
Diagramm 11:	Temperaturverlauf im Einbautenmodul (zweistufig, keramische Einbauten).	90
Diagramm 12:	Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs ohne und mit metallischen und keramischen Einbauten.	92
Diagramm 13:	Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit keramischen Einbauten bei Abgasförderdrücken von 8, 12 und 16 Pascal.	94
Diagramm 14:	Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit metallischen Einbauten bei Abgasförderdrücken von 8, 12 und 16 Pascal.	95
Diagramm 15:	Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit keramischen Einbauten bei unterschiedlichen Brennstoffmassen.	97
Diagramm 16:	Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit metallischen Einbauten bei unterschiedlichen Brennstoffmassen.	98
Diagramm 17:	Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit keramischen Einbauten mit drei und vier Scheiten.	100
Diagramm 18:	Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit metallischen Einbauten mit drei und vier Scheiten.	100
Diagramm 19:	Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit metallischen sowie	

	keramischen Einbauten bei der Verbrennung von Fichten- und Buchenholz.	103
Diagramm 20:	Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs ohne sowie mit metallischen und keramischen Einbauten.	104
Diagramm 21:	Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit keramischen Einbauten bei unterschiedlichen Abgasförderdrücken.	106
Diagramm 22:	Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit metallischen Einbauten bei unterschiedlichen Abgasförderdrücken.	107
Diagramm 23:	Verläufe der Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit keramischen Einbauten bei unterschiedlichen Brennstoffmassen.	108
Diagramm 24:	Verläufe der Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit metallischen Einbauten bei unterschiedlichen Brennstoffmassen.	109
Diagramm 25:	Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit keramischen Einbauten mit drei und vier Scheiten.	110
Diagramm 26:	Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit metallischen Einbauten mit drei und vier Scheiten.	111
Diagramm 27:	Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit keramischen Einbauten bei der Verbrennung von Fichten- und Buchenholz.	112
Diagramm 28:	Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit metallischen Einbauten bei der Verbrennung von Fichten- und Buchenholz.	113
Diagramm 29:	Partikelverteilung ohne und mit metallischen (Pall-Ringe 35 mm) sowie keramischen Einbauten (Pall-Ringe 50 mm).	119
Diagramm 30:	Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs ohne und mit metallischen und keramischen Einbauten.	123
Diagramm 31:	Kohlenstoffmonoxid ohne sowie mit Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen.	125
Diagramm 32:	Kohlenstoffmonoxid ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei einem Förderdruck von 8 Pascal.	126
Diagramm 33:	Kohlenstoffmonoxid ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei einem Förderdruck von 16 Pascal.	128
Diagramm 34:	Kohlenstoffmonoxid ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei 2,5 kg.	129
Diagramm 35:	Kohlenstoffmonoxid ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei 4 Scheiten/Auflage.	131

Diagramm 36:	Kohlenstoffmonoxid ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei zwei Scheiten/Auflage.....	132
Diagramm 37:	Kohlenwasserstoffe während des Betriebs ohne und mit metallischen und keramischen Einbauten.....	133
Diagramm 38:	Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs ohne sowie mit Einbautentechnik bei optimalen Betriebseinstellungen.....	134
Diagramm 39:	Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen mit 12 Pascal sowie mit metallischen und keramischen Einbauten bei einem Abgasförderdruck von 8 Pascal.....	135
Diagramm 40:	Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen mit 12 Pascal sowie mit metallischen und keramischen Einbauten bei einem Abgasförderdruck von 16 Pascal.....	136
Diagramm 41:	Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei unterschiedlichen Brennstoffmassen.....	138
Diagramm 42:	Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten mit einer Auflage von vier Scheiten.....	139
Diagramm 43:	Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei einer Auflage mit zwei Scheiten.....	140
Diagramm 44:	Partikelanzahlverteilung beim Einsatz keramischer Einbauten beim Nennwärmeleistungsbetrieb in der Speicherfeuerstätte.....	144
Diagramm 45:	Wirkungsgrade beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne und mit Einbautentechnik.....	145

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrad bei Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß der ersten und zweiten Stufe der 1. BImSchV.	16
Tabelle 2:	Aachener Brennstoffverordnung.	17
Tabelle 3:	Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrad bei Kleinfeuerungen für feste Brennstoffe gemäß Art. 15a B-VG in Österreich.	17
Tabelle 4:	Emissionsgrenzwerte gemäß Schweizer Luftreinhalteverordnung.	18
Tabelle 5:	Emissionsgrenzwerte und Jahresnutzungsgrad bei Einzelraumheizgeräten für feste Brennstoffe gemäß vorläufiger Ökodesign-Richtlinie.	18
Tabelle 6:	Ergebnisse der Betriebsszenarien im Nennlastbetrieb.	34
Tabelle 7:	Bewertung der Struktur bezüglich des Einsatzes in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen [Aleysa et al. 2015].	56
Tabelle 8:	Erforderliche Angaben zur Auslegung der Einbautentechnik.	58
Tabelle 9:	Versuchsprogramm mit und ohne zusätzliche Einbauten mit dem freistehenden Raumheizer.	85
Tabelle 10:	Reduktionsgrade gefährlicher Kohlenwasserstoffverbindungen gemessen mit einem FTIR-Abgasanalysator der Firma ANSYCO Analytische Systeme und Componenten GmbH bei Einsatz von keramischen Einbauten im freistehenden Raumheizer.	114
Tabelle 11:	Mittelwerte der Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid und der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb des freistehenden Raumheizers.	116
Tabelle 12:	Ergebnisse aus der gravimetrischen Staubmessung während der Versuchsreihen mit dem freistehenden Raumheizer.	117
Tabelle 13:	Mittlere Wirkungsgrade beim Betrieb des freistehenden Raumheizers mit und ohne Einbautentechnik.	120
Tabelle 14:	Vorversuchsprogramm mit und ohne zusätzliche Einbauten beim Betrieb der Speicherfeuerstätte.	122
Tabelle 15:	Auswertung gasförmiger Emissionen mit und ohne Einbautentechnik beim Einsatz in der Speicherfeuerstätte.	141
Tabelle 16:	Auswertung staubförmiger Emissionen mit und ohne Einbautentechnik.	143

1 Einleitung und Ziele

Nach den vorliegenden Erkenntnissen sind die häuslichen Kleinfeuerungsanlagen eine nicht zu vernachlässigende Quelle für Feinstaub und andere Schadstoffe wie Kohlenstoffmonoxid (CO), flüchtige organische Verbindungen (VOCs) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) [Klippel et al. 2006, BMU 2007]. Die in Wohngebieten am häufigsten vorkommenden Kleinfeuerungsanlagen haben eine thermische Nennwärmeleistung kleiner als 15 kW. Tendenziell sollen aufgrund einer zunehmenden Anzahl an Passiv- und Niedrigenergiehäusern sowie durch die energetische Sanierung bestehender Gebäude immer mehr Kleinfeuerungsanlagen mit einer thermischen Leistung kleiner als 15 kW zum Einsatz kommen. Die Verbesserung der Verbrennung in diesem Leistungsbereich der Kleinfeuerungsanlagen soll zu einer signifikanten Reduzierung der Schadstoffemissionen in Wohngebieten sowie und zum aktiven Umwelt- und Klimaschutz beitragen.

Zur Schadstoffminderung in Biomassefeuerungsanlagen der 1. BImSchV kommen Präventiv-, Primär- und Sekundärmaßnahmen zum Einsatz: Zu den Präventivmaßnahmen zählen die gesetzlichen und rechtlichen Maßnahmen mit den entsprechenden Verordnungen, Normen und Richtlinien, welche die Zulassung, Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb von Feuerungsanlagen bei der Herstellung sowie in der Praxis regeln. Eine wichtige Präventivmaßnahme ist die permanente Betriebsüberwachung von Kleinfeuerungsanlagen, welche sich dank neuer Sensortechnologien technisch und wirtschaftlich vor allem in zentralen Heizkesseln realisieren lässt und zunehmend an Bedeutung gewinnt. Hierdurch kann eine angemessene Bewertung bzw. Kontrolle im Vergleich zur heutigen Kontrolle durch den Schornsteinfeger gemäß der 1. BImSchV erreicht werden.

Primärmaßnahmen können konzeptionelle, konstruktive und regelungstechnische Maßnahmen sowie integrierte Technologien sein, welche die Verbesserung des Verbrennungsverhaltens gewährleisten und prinzipiell vor dem Wärmeaustauscher in den Kleinfeuerungsanlagen zum Einsatz kommen. Außerdem zählt die Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens des Brennstoffes durch die Behandlung mit bestimmten Additiven oder die gezielte Reduzierung des Anteils der schadstoffbildenden Komponenten (wie z. B. Kalium, Stickstoff, Chlor, Schwefel usw.) zu den wichtigsten Primärmaßnahmen der Schadstoffminderung.

Primärmaßnahmen zeigen in der Regel eine sichere Funktion bezüglich der Schadstoffminderung und Effizienzerhöhung. Die Reduzierung der Schadstoffemissionen durch Sekundärmaßnahmen ist immer mit hohem technischem und wirtschaftlichem Aufwand verbunden. Soll die Minderung der Schadstoffe ausschließlich durch nachgeschaltete Abgasbehandlungssysteme (Sekundärmaßnahmen) praktiziert werden, wird der Einsatz von Kleinfeuerungsanlagentechnik zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser in vielen Bereichen aus folgenden Gründen beschränkt.

- Höhere Anschaffungs-, Wartungs- und Pflegekosten im Vergleich zu den Kosten der Kleinfeuerungsanlagen ohne nachgeschaltete Abgasbehandlungssysteme.
- Bezüglich des Einsatzes im Haushalt stellt der Platzbedarf einen entscheidenden Faktor für den Einsatz der Biomassekleinfeuerungsanlagen dar. Für die Verwendung einer Abgasbehandlungsanlage sollte entsprechend Platz eingeplant und zur Verfügung gestellt werden.
- Beim Einsatz von Abgasbehandlungssystemen im Haushaltsbereich sollten aus Versicherungsgründen bestimmte Anforderungen und entsprechende Sicherheitsmaßnahmen eingehalten werden. Das führt zu hohen Kosten und somit zur erschwerten Akzeptanz bei vielen Nutzern. Der Einsatz von Hochspannung wie beispielsweise bei einem Elektroabscheider oder Druckbehältern wie bei Oberflächenfiltern (Abreinigungsfilter) im Haushalt wird von vielen Nutzern zunehmend kritisch betrachtet. Schallemissionen und Elektrosmog sind wichtige und aktuelle Kriterien für den Einsatz von Geräten im Wohnbereich.
- Da solche Abgasbehandlungssysteme nicht voll automatisiert sind, sind ein entsprechender Aufwand und Fachkräfte für den Betrieb solcher meistens technisch komplizierten Systeme vor Ort gefragt. Die technische Pflege, Reinigung und Wartung kann nur durch ausgebildete Fachkräfte durchgeführt werden, was die Erhöhung der Betriebskosten und somit eine abnehmende Akzeptanz seitens der Nutzer zur Folge hat.
- Die bisher entwickelten Abgasbehandlungssysteme, insbesondere Staubabscheider, weisen bisher keine Stabilität im Dauerbetrieb auf. Werden diese im Praxisbetrieb nicht kontinuierlich überwacht, ist eine Schadstoffminderung nur bedingt zu erreichen.

In Kleinfeuerungsanlagen, vor allem in handbeschickten Anlagen, ist immer mit unvollständiger Verbrennung in ungünstigen Betriebsphasen, wie z. B. in der Anfahrbetriebsphase und im Teillastbetrieb, oder beim Einsatz ungünstiger Brennstoffe zu rechnen. Die bei der unvollständigen Verbrennung gebildeten Staubpartikel verursachen viele Probleme in den nachgeschalteten Abgasbehandlungssystemen, unabhängig von dem Funktionsprinzip. Aus diesem Grund gewinnt die Emissionsminderung durch Primärmaßnahmen zunehmend an Bedeutung und stellt eine unvermeidbare Maßnahme vor allem in niedrigen Leistungsbereichen ($< 100 \text{ kW}_{\text{th}}$) dar. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen sollten die Sekundärmaßnahmen zur Schadstoffminderung in Biomassefeuerungen erst zum Einsatz kommen, wenn die Primärmaßnahmen erschöpft sind und nicht mehr effektiv genutzt werden können.

Der Ansatz des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP zur nachhaltigen Emissionsminderung in Einzelraumfeuerungsanlagen beruht darauf, dass die Minderung der Schadstoffemissionen im Feuerraumbereich, der sogenannten thermisch aktiven Zone, unmittelbar vor der Wärmeabgabe erfolgt und dort

beendet werden soll. Die bei der Verbrennung entstehende Wärme soll durch entsprechende Technologien (integrierte Oxidationsreaktoren bzw. Filter-Reaktor-Systeme) so verwaltet werden, dass sie effizient für die Oxidation eingesetzt und anschließend ohne Verluste genutzt werden kann. Das Wirkungsprinzip der in den Feuerraum integrierten Oxidationsreaktoren beruht auf der Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens durch die Schaffung bzw. Sicherstellung günstiger Oxidationsbedingungen während der Verbrennung. Dabei soll eine ausreichende Energiemenge in Form von Wärme in einem Hochtemperaturspeichermodule gespeichert werden, welches auch durch seine spezielle Architektur (oder Struktur) die Intensivierung der Durchmischung von brennbaren Abgasbestandteilen mit der Verbrennungsluft sowie Verlängerung der aktiven Verweilzeit bzw. Vergrößerung der aktiven Reaktionszone während der Verbrennung gewährleistet. Die gespeicherte Energie soll die Oxidation in ungünstigen Betriebsphasen, wie z. B. beim Auflegen von Holz, ermöglichen sowie zu einem stabilen Betrieb während des gesamten Verbrennungsprozesses führen. Außerdem werden die organischen staubförmigen Schadstoffemissionen (wie z. B. Ruß und Aerosole) bei ungünstigen Betriebsphasen an der Oberfläche der Einbauten aufgrund ihrer adhäsiven und sehr rauen Eigenschaften abgeschieden und beim Erreichen günstiger Temperaturen oxidiert. Anorganische Feinststäube (hauptsächlich Metalloxide und Salze), die bei der Verbrennung von Biomasse unterschiedliche chemische Beschaffenheiten aufweisen, werden bei hohen Temperaturen aufgrund ihrer unterschiedlichen elektrischen Ladungen, Turbulenzen und Schergradienten agglomerieren und lassen sich dadurch besser mechanisch im Einbautenmodul abscheiden.

Zur Untersuchung und gezielten Entwicklung von Einbauten zum Einsatz als integrierte Schadstoffminderungstechnologien, wurde im Rahmen eines von der DBU geförderten Projekts [AZ: 30550] ein spezieller Abgassimulator aufgebaut, der die Nachbildung von Abgas aus der Verbrennung von Biomasse sowie die Einstellung definierter Betriebsbedingung bzw. physikalischer, chemischer und thermodynamischer Parameter ermöglicht [Aleysa et al. 2015]. Dieser Abgassimulator wurde zur Untersuchung der Korrelation der Filter-Reaktor-Architektur mit thermophysikalischen Funktionsbedingungen zur Erforschung und Entwicklung eines nicht-katalytischen 3D-Porösen Filter-Reaktor-Systems für biomassebetriebene Kleinf Feuerungsanlagen eingesetzt. In diesem Projekt wurden zwei unterschiedliche Strukturtypen (deterministische und nicht-deterministische Strukturen) hinsichtlich des sicheren Einsatzes in Einzelraumfeuerungsanlagen zur Minderung der staub- und gasförmigen Emissionen untersucht.

Deterministische Strukturen auf Basis von metallischen und keramischen Füllkörpern (bzw. Einbauten) haben sich besonders für den sicheren und effektiven Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen bewährt. Diese Strukturen können sowohl als Filter und gleichzeitig auch als Reaktor agieren. Dadurch tragen sie massiv zur Schadstoffminderung und Effizienzerhöhung von handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen bei (siehe Abschnitt 4.5).

Nicht-deterministische Strukturen funktionieren als Filter aber nicht als Reaktor. Die Filtration erfolgt rein mechanisch durch den Sperreffekt oder Sedimentation. Der Aufbau eines Staubkuchens auf der Oberfläche führt dabei schnell zu einer Erhöhung des Druckverlusts bzw. zur Verstopfung des Filters, wodurch das Abgas bei einer gestörten Verbrennungsluftzufuhr aus den Feuerstätten in den Aufstellraum gelangen kann (siehe Abschnitt 4.5).

Auf Grundlage dieser Erkenntnis werden im Rahmen dieses Forschungsprojekts ausschließlich deterministische Strukturen (metallische und keramische Pall-Ringe) zur Minderung von gas- und staubförmigen Schadstoffen in Einzelraumfeuerungsanlagen untersucht.

2 Inhalt des Projekts

Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Erforschung und Entwicklung einer neuartigen innovativen Technik, die sogenannte Einbautentechnik, zur Schadstoffminderung und Effizienzerhöhung in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen. Dabei wurde die Einbautentechnik unter normativen und praktischen Einsatzbedingungen in den zwei folgenden Feuerungsanlagentypen für jeweils eine Verbrennungsversuchsanlage untersucht:

- Feuerungsanlagen mit einer schnellen Wärmeabgabe im Aufstellraum, wie beispielsweise freistehende Raumheizer gemäß DIN EN 13240 sowie Kamineinsätze und offene Kamine gemäß DIN EN 13229. Für die Untersuchung der Einbautentechnik für diesen Anlagentyp wurde ein Prototyp eines freistehenden Raumheizers der Firma Wodtke GmbH als Verbrennungsversuchsanlage eingesetzt. Dieser Raumheizer verfügt über Schaumkeramikfilter, welche ein typisches Beispiel für integrierte Technologien mit nicht-deterministischer Struktur darstellen.
- Feuerungsanlagen mit einer langsamen Wärmeabgabe im Aufstellraum wie zum Beispiel Grundöfen und Speicheröfen gemäß DIN EN 15250. In diesem Projekt wurde eine handelsübliche Speicherfeuerstätte der Firma Rondo Ringkachelofen GmbH für die Untersuchung der Einbautentechnik verwendet.

Die zwei genannten Feuerungsanlagentypen unterscheiden sich in ihrer Betriebsweise sowohl auf dem Prüfstand bei der Typprüfung als auch im Praxisbetrieb stark voneinander. Im Abschnitt 5.2 sind die beiden eingesetzten Verbrennungsversuchsanlagen mit allen technischen Daten, betrieblichen Besonderheiten und normativen Anforderungen ausführlich beschrieben.

Im Rahmen dieses Projekts wurden nur deterministische Strukturen zum Aufbau des Einbautenmoduls verwendet und untersucht. Nicht-deterministische Strukturen können die wichtigsten Voraussetzungen für eine sichere und wirksame Funktion der Einbautentechnik in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen nicht erfüllen und sollten somit nicht eingesetzt werden. Zum Aufbau einer deterministischen Struktur bzw. eines

Einbautenmoduls wurden spezielle Füllkörper (metallische Pall-Ringe 35 mm und keramische Pall-Ringe 50 mm) verwendet. Die Eignung dieser Einbauten zur Minderung von staub- und gasförmigen Emissionen sowie zum sicheren Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen wurde im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP im Rahmen anderer Forschungsprojekte ausführlich untersucht (siehe Abschnitt 4.5).

Zur Entwicklung und Beurteilung der Einbautentechnik wurden experimentelle Untersuchungen zum Abbrandverhalten, zum Verbrennungsverhalten, zum strömungstechnischen Verhalten und zum Effizienz- sowie Emissionsverhalten durchgeführt.

- **Abbrand- und Verbrennungsverhalten:**
Die Untersuchungen zum Abbrand- bzw. Verbrennungsverhalten sind wichtig zur Beurteilung der Verbrennungs- und Betriebsstabilität beim Einsatz verschiedener Brennstoffqualitäten, bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und Bedienqualitäten der Feuerungsanlagen. Dazu gehören auch die Untersuchungen zur Verbrennungseffizienz, Temperaturverteilung und zum Verbrennungsverhalten in Einbautenmodulen.
- **Emissionsverhalten:**
Die Art und Menge der gebildeten gas- und staubförmigen Schadstoffemissionen stellen wichtige Parameter zur Beurteilung der Einbautentechnik dar. Es sind Messungen über die Konzentrationen von Feinstaub und Kohlenstoffmonoxid durchzuführen, die für die Einhaltung der Grenzwerte gemäß der 1. BImSchV erforderlich sind. Zusätzlich werden nicht verbrannte Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) und sonstige gefährliche organische Verbindungen sowie Stickstoffoxide gemessen, welche bei Kleif Feuerungsanlagen zunehmend an Bedeutung gewinnen.
- **Leistungsfähigkeit der Einbautentechnik:**
Die Leistungsfähigkeit beschreibt den Umsatz von gas- und staubförmigen Schadstoffen durch die thermische Oxidation im Einbautenmodul. Sie lässt sich entweder durch den Abscheidegrad oder durch die Abscheideleistung ermitteln. Der Abscheidegrad ergibt sich durch den prozentualen Unterschied zwischen dem Schadstoffgehalt im Abgas beim Betrieb der Verbrennungsversuchsanlagen mit und ohne Einbautentechnik. Die Abscheideleistung wird durch den Schadstoffgehalt im Reingas unter Betrachtung jeweiliger Grenzwerte bzw. nach der thermischen Oxidation ermittelt. Bei der Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Einbautentechnik unter praxisnahen Bedingungen soll der Einfluss folgender betrieblichen Aspekte erforscht werden:
 - Art der Beschickung,
 - Form, Größe und Art der Holzscheite,

- verbrennungstechnische Kenndaten vom Brennstoff bzw. Holz (Feuchte, Energiedichte usw.),
 - Wetterverhältnisse bzw. Unterdruck (Naturzug) in der Abgasanlage,
 - Einstellung der Verbrennungsluft bzw. Betriebszustände (Vollastbetrieb, Teillastbetrieb),
 - Benutzerverhalten bzw. Bedienqualität der Feuerungsanlage.
- Strömungstechnisches Verhalten:
Das strömungstechnische Verhalten beschreibt den Druckverlust in den Feuerungsanlagen bei verschiedenen Abgasvolumenströmen während des Betriebs. Es ist ein wichtiger Parameter zur Auslegung der Einbautentechnik sowie zur Bewertung der Betriebsstabilität vor allem bei mit Naturzug betriebenen Feuerungsanlagen.

Ein wichtiger Punkt dieses Projekts ist die Entwicklung einer verfahrenstechnischen Grundlage zur Auslegung der Einbautentechnik für den Einsatz in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen. Außerdem soll auf Basis der erreichten Ergebnisse und erworbenen Erfahrungen die Umsetzbarkeit der Einbautentechnik in der Praxis bewertet werden.

3 Stand der Wissenschaft und der Technik

In diesem Kapitel werden die immissionsschutzrechtlichen Anforderungen an Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland und Europa, die Grundlage der Biomasseverbrennung und der Schadstoffbildung mit den primären Reduzierungsmöglichkeiten, Problematiken in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen und die bisher bekannten integrierten Technologien zur Schadstoffminderung und Effizienzerhöhung dargestellt.

3.1 Immissionsschutzrechtliche Anforderungen an Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland und Europa

Die Errichtung und Unterhaltung der Kleinf Feuerungsanlagen in Deutschland werden durch die Bestimmungen der 1. BImSchV geregelt und überwacht. In der 1. BImSchV sind die zugelassenen Brennstoffe (sogenannte Regelbrennstoffe) sowie die Emissionsgrenzwerte in Abhängigkeit vom Brennstoff und der Anlagenleistung festgelegt. Einzelraumfeuerungsanlagen werden dezentral bzw. in einzelnen Wohnräumen eingesetzt und machen über 90 % der gesamten Biomassefeuerungen der 1. BImSchV aus. Sie können sowohl für die Bereitstellung von Wärme, als auch für Warmwasser eingesetzt werden. Vor dem Inverkehrbringen müssen Einzelraumfeuerungsanlagen nach bestimmten Normen (Raumheizer: DIN EN 13240, Kamineinsätze und Kachelöfen: DIN EN 13229 und Speicherfeuerstätten: DIN EN 15250 usw.) von einer unabhängigen Prüfstelle wie z. B. der Prüfstelle Feuerstätten und Abgasanlagen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP (D-PL-11140-11-03) geprüft werden. Einzelraumfeuerungsanlagen unterliegen im Gegensatz zu den zentral betriebenen Feuerungsanlagen keiner wiederkehrenden Emissionsüberwachung durch den Schornsteinfeger. Während der

Typprüfung müssen Einzelraumfeuerungsanlagen bestimmte Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrade einhalten. Die Tabelle 1 zeigt die Anforderungen an Emissionen sowie an den Mindestwirkungsgrad gemäß der ersten und zweiten Stufe der 1. BImSchV an. Die in Tabelle 1 dargestellten Konzentrationen beziehen sich auf den Vergleichszustand (Abgas trocken, im Normzustand bezogen auf einen Volumengehalt von Sauerstoff in Höhe von 13 % bezogen). Es ist zu erwähnen, dass der Begriff „Feuerstätte“ im Sinne der 1. BImSchV ein allgemeiner Begriff für die Beschreibung aller häuslichen Kleinfeuerungsanlagen unabhängig vom Brennstoff (gasförmige, flüssige oder feste Brennstoffe) sowie dem Einsatzort (zentral im Keller oder dezentral im Wohnraum) ist. Die Unterscheidung ergibt sich durch die jeweiligen bezogenen Prüfnormen.

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrad bei Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß der ersten und zweiten Stufe der 1. BImSchV.

Feuerstätten	Prüfnormen	1. Stufe, Errichtung seit 22.03.2010		2. Stufe, Errichtung seit 31.12.2014		1. und 2. Stufe, Errichtung seit 22.03.2010
		CO	Staub	CO	Staub	Mindestwirkungs- grad
		[g/Vm ³]	[g/Vm ³]	[g/Vm ³]	[g/Vm ³]	
Raumheizer mit Flachfeuerung	DIN EN 13240	2,00	0,075	1,25	0,04	73
Raumheizer mit Füllfeuerung	DIN EN 13240	2,50	0,075	1,25	0,04	70
Speicherfeuerstätten	DIN EN 15250	2,00	0,075	1,25	0,04	75
Kamineinsätze (geschlossen)	DIN EN 13229	2,00	0,075	1,25	0,04	75
Kachelofeneinsätze mit Flachfeuerung	DIN EN 13229	2,00	0,075	1,25	0,04	80
Kachelofeneinsätze mit Füllfeuerung	DIN EN 13229	2,50	0,075	1,25	0,04	80
Herde	DIN EN 12815	3,00	0,075	1,50	0,04	70
Heizungsherde	DIN EN 12815	3,50	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

Neben den in der 1. BImSchV genannten Emissionsanforderungen für das gesamte Bundesgebiet gibt es außerdem regionale Regelungen wie z. B. die Aachener Brennstoffverordnung. Die Grenzwerte der regionalen Verordnungen müssen für eine gesetzliche Gültigkeit strenger sein als die Vorgaben der 1. BImSchV. Zusätzlich zu den in der 1. BImSchV genannten Grenzwerten über Kohlenstoffmonoxid und Stäube gibt es in den Brennstoffverordnungen auch Grenzvorgaben für NO_x. Die Anforderungen der 1. BImSchV an die Emissionen sowie an den Mindestwirkungsgrad sind deutlich höher als die Anforderungen der europäisch harmonisierten

Prüfnormen. Normanforderungen regeln lediglich das Inverkehrbringen von Feuerungsanlagen auf den europäischen Markt, sodass solche Anlagen im Haushalt sicher betrieben werden können. In EU-Ländern, in denen keine immissionsschutzrechtlichen Anforderungen vorhanden sind, müssen nur die Emissionsgrenzwerte der europäisch harmonisierten Prüfnormen eingehalten werden. In allen europäisch harmonisierten Prüfnormen soll lediglich ein Grenzwert (1 Vol.-% entspricht 10.000 ppm) für Kohlenstoffmonoxid auf dem Prüfstand bei der Typprüfung eingehalten werden. Andere Schadstoffe wie z. B. Feinstaub, Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide werden bisher nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Aachener Brennstoffverordnung.

Feuerstätten	CO	Staub	NO _x
	[mg/Vm ³]	[mg/Vm ³]	[mg/Vm ³]
Aachener Festbrennstoffverordnung, seit 09.10.2010			
Einzelraumfeuerungsanlagen (4 - 15 kW)	1.250	40	---

Nicht nur in Deutschland sind die Anforderungen an den Betrieb von Kleinf Feuerungsanlagen gestiegen, sondern auch in Österreich sowie in der Schweiz hat es Verschärfungen der Emissionsgrenzwerte gegeben. Seit dem ersten Januar 2015 gelten in Österreich, in Analogie zu Deutschland, neue Grenzwerte gemäß der zweiten Stufe der österreichischen Emissionsschutzverordnung (Art. 15a B-VG). In der Tabelle 3 sind die Grenzwerte für Österreich dargestellt. Im Gegensatz zur deutschen Verordnung werden in Österreich auch Grenzwerte für Kohlenwasserstoffe vorgegeben. Die österreichischen Grenzwerte unterscheiden sich von den Anderen besonders dadurch, dass sich die erlaubten Schadstoffmengen nicht auf das Abgasvolumen (als Massenkonzentration) beziehen, sondern auf den Energiegehalt des Brennstoffs.

Tabelle 3: Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrad bei Kleinf Feuerungen für feste Brennstoffe gemäß Art. 15a B-VG in Österreich.

Feuerstätte	1. Stufe, vor dem 01.01.2015				
	CO	NO _x	OGC	Staub	Mindest- wirkungsgrad
	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[%]
Herde	1.100	150	80	60	70
Raumheizer, Kamineinsätze Speicheröfen	1.100	150	80	60	78
2. Stufe, seit dem 01.01.2015					
Herde	1.100	150	50	35	72
Raumheizer, Kamineinsätze Speicheröfen	1.100	150	50	35	80

In der Schweiz gelten ebenfalls die europäisch harmonisierten Prüfnormen. Die Emissionsgrenzwerte bei der Verbrennung von Biomasse in Einzelraumfeuerungsanlagen werden durch die Luftreinhalteverordnung geregelt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Emissionsgrenzwerte gemäß Schweizer Luftreinhalteverordnung.

Feuerstätte	1. Stufe, seit 01.01.2008		2. Stufe, seit 31.12.2014	
	CO	Staub	CO	Staub
	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
Raumheizer	1.500	100	1.500	75
Herd	3.000	110	3.000	90
Kamineinsatz/ Kachelofen	1.500	100	1.500	75
Pelletofen	500	50	500	40

Für eine einheitliche Regelung der immissionsschutzrechtlichen Anforderungen in Europa wird nun an der Entwicklung der Ökodesign-Richtlinie gearbeitet. In der Tabelle 5 sind die bisher entworfenen Emissionsanforderungen der neuen Ökodesign-Richtlinie für alle EU-Länder dargestellt, deren Emissionsvorgaben ab dem 1. Januar 2022 eingehalten werden müssen.

Tabelle 5: Emissionsgrenzwerte und Jahresnutzungsgrad bei Einzelraumheizgeräten für feste Brennstoffe gemäß vorläufiger Ökodesign-Richtlinie.

Einzelraumheizgeräte	Ökodesign-Richtlinie ab dem 01.01.2022				
	CO	NO _x	OGC	Staub	Jahresnutzungsgrad
	[mg/Vm ³]	[mg/Vm ³]	[mg/Vm ³]	[mg/Vm ³]	[%]
Einzelraumheizgerät (offene Brennkammer)	2.000	200	120	50	30
Einzelraumheizgerät ⁽¹⁾ (geschlossene Brennkammer)	1.500	200	120	40	65
Einzelraumheizgerät (geschlossene Brennkammer) mit Pellets	300	200	60	20	79
Herde	1.500	200	120	40	65

Die neuen Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Einzelraumheizgeräten sehen Grenzwerte für Schadstoffkonzentrationen aus Einzelfeuerstätten mit geschlossenen und offenen Brennkammern vor. Die Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid sowie von Feinstaub sollen in allen EU-Ländern gesenkt werden. Außerdem gibt es Vorgaben über die Einhaltung von Grenzwerten für Stickstoffoxide von maximal 200 mg/Vm³.

3.2 Grundlagen zur Verbrennung und Schadstoffbildung

3.2.1 Thermochemische Umwandlung fester Brennstoffe

Die thermochemische Umwandlung von Brennstoffen ist in vier unterschiedliche Phasen - Trocknung, Entgasung, Vergasung und Oxidation - unterteilt. Die Umwandlungsphasen unterscheiden sich teilweise durch den Temperaturbereich, in dem sie ablaufen können, und wesentlich durch die dem Prozess zugeführte Sauerstoffmenge. Die beiden Parameter Temperatur und Sauerstoffkonzentration bestimmen die physikalischen und chemischen Umwandlungsreaktionen und infolgedessen die Prozessprodukte. Im Folgenden werden die Umwandlungsphasen näher beschrieben [Marutzky 2002, Urban 2010].

Aufheizung und Trocknung

Der Umwandlungsprozess beginnt mit der Erwärmung der feuchten Brennstoffmasse. Wenn sie eine Temperatur von über 65 °C erreicht, beginnt das im Brennstoff vorhandene freie und gebundene Wasser zu verdampfen [Kaltschmitt et al. 2009]. Bei einer Temperatur von bis zu etwa 200 °C wird in der Regel das Wasser vollständig aus der Brennstoffmasse ausgetrieben [Kaltschmitt et al. 2009]. Die für diesen Vorgang benötigte Energie entspricht der Energie, die für die Erwärmung der Brennstoffmasse sowie zur Verdampfung des vorhandenen Wassers nötig ist. Bei der Trocknung können bei einer Temperatur von über 150 °C Spuren organischer Komponenten wie z. B. Essig- und Ameisensäure sowie Kohlenstoffmonoxid mit freigesetzt werden [Marutzky 2002]. Bei nicht ausreichend hohen Temperaturen, wie beispielsweise in der Anfahrbetriebsphase der Biomassefeuerungen, werden diese Komponenten emittiert und in die Umwelt getragen.

Pyrolytische Zersetzung (Entgasung)

Die pyrolytische Zersetzung bzw. die Entgasung von festen Biomassen beginnt bei einem Temperaturbereich von 150 °C bis 200 °C und endet je nach Brennstoffart und Umgebungsbedingungen bei einer Temperatur von 500 °C bis 600 °C. Dabei werden die Makromoleküle, aus denen sich der Brennstoff zusammensetzt, durch die Wärmeeinwirkung aufgebrochen, irreversibel zerstört und in Form von Brenngasen und Dämpfen (wie z. B. CO₂, H₂, CH₄, H₂O und CH₃OH) sowie anderen dampfförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen (z. B. Teere) freigesetzt [Marutzky 2002, Urban 2010]. Da die Entgasung ein endothermer Prozess ist, muss Energie zugeführt werden. Diese Energie kann, je nach Verfahren, entweder extern oder durch Teilverbrennung bereitgestellt werden. Bei einer weiteren Erwärmung der Biomasse (ab etwa 500 °C bis 600 °C) entstehen keine kondensierbaren oder gasförmigen Komponenten mehr, da in diesem Temperaturbereich die organischen Makromoleküle bereits vollständig freigesetzt worden sind. Es können jedoch aufgrund des sich im Brennstoff befindenden Sauerstoffs auch Sekundärreaktionen zwischen den freigesetzten Gasen untereinander und mit dem verbliebenen Kohlenstoff stattfinden und dadurch weitere Gase wie CO und CO₂ gebildet werden. Bei der pyrolytischen Zersetzung werden, je nach

Brennstoff, zwischen 60 % (wie z. B. bei Gärrestpellets) und 85 % (wie z. B. bei Holzpellets) des organischen Anteils abgebaut. Nach der pyrolytischen Zersetzung verbleibt ein Rückstand, der überwiegend aus Kohle und Asche besteht [Marutzky 2002]. Der Verlauf der pyrolytischen Zersetzung und die verbrennungstechnischen Eigenschaften der produzierten Brenngase sind von der Art und Zusammensetzung des Brennstoffs, der maximalen Entgasungstemperatur, der Aufheizgeschwindigkeit, der wirksamen Verweilzeit und der Katalysatoren abhängig [Urban 2011]. Die Qualität der produzierten Brenngase spielt eine ausschlaggebende Rolle, sodass dadurch die gesamte Verbrennung und infolgedessen die Auslegung der Feuerungskonstruktion beeinflusst werden können.

Vergasung

Die Vergasung findet nach Abschluss der pyrolytischen Zersetzung als exothermer Prozess, d. h. unter Energiefreisetzung, statt. Dabei werden die bei der pyrolytischen Zersetzung entstehenden gasförmigen, flüssigen und vor allem festen Produkte durch weitere Wärmeeinwirkung infolge der Anwesenheit von sauerstoffhaltigen Vergasungsmitteln (wie z. B. Luft, Wasserdampf, Kohlenstoffmonoxid sowie reiner Sauerstoff) zu weiteren nutzbaren Brenn- und Synthesegasen umgewandelt. Die Vergasungsmittel müssen dem Prozess so zugeführt werden, dass während der Vergasung immer understöchiometrische Bedingungen gewährleistet werden können. Zu den bei der Vergasung produzierten Komponenten zählen CO, CO₂, H₂, CH₄ sowie N₂, sofern Luft als Vergasungsmittel verwendet wird [Marutzky 2002]. Die Zusammensetzung des Pyrolysegases wird wesentlich durch die Zusammensetzung und die morphologischen Eigenschaften des Eingangsmaterials, der Menge und Art des Vergasungsmittels, Reaktionsbedingungen (wie Temperatur, Druck und Verweilzeit) und durch das Vergasungsverfahren beeinflusst. Vergasungsreaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen. Je nach Temperaturbereich verschieben sich die Gleichgewichtslagen. Beispielsweise entsteht bei einer Temperaturerhöhung von 800 °C bis 1.000 °C mehr Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff, hingegen weniger Methan [Marutzky 2002, Urban 2009].

Bei Biomassefeuerungen mit gestufter Verbrennung wird Luft als Vergasungsmittel eingesetzt. Dabei finden die Entgasung und die Vergasung parallel in einem Reaktionsraum (Vergasungszone) statt. Die Entgasung findet dabei trotz der Anwesenheit von Sauerstoff statt, da die bei diesem Entgasungsvorgang entstehenden Brenngase aus dem Brennstoff nach außen ausgetrieben werden und den in der Umgebung befindlichen Sauerstoff verdrängen, sodass der Zersetzungsprozess bis zum Abschluss ohne Sauerstoff ablaufen kann. Die bei der Vergasung entstehenden Brenngase werden aus der Vergasungszone (Vergasungskammer) in den Feuerraum weitergeleitet und dort unter Zugabe von Sekundärluft (Sauerstoff) oxidiert [Marutzky 2002].

Oxidation

Das bei der Vergasung entstehende Brenngas wird mit Sauerstoff unter Wärmefreisetzung zu CO₂ und H₂O oxidiert. Zudem können bei der Oxidation, je nach elementarer Zusammensetzung des Brennstoffs vor allem auch NO, NO₂, SO₂, HCl und HF sowie staubförmige Schadstoffemissionen wie Schwermetalle, Metalloxide und organische sowie anorganische Stäube gebildet und freigesetzt werden. Hinzu kommen bei unvollständiger Oxidation Kohlenstoffmonoxid, Wasserstoff und Kohlenwasserstoffe.

Für eine vollständige Oxidation müssen folgenden Bedingungen realisiert werden [Marutzky 2002, Joos 2006]:

- Es muss genügend Sauerstoff (Sekundärverbrennungsluft) der Verbrennungskammer zugeführt werden. Bei Kleinf Feuerungsanlagen liegt die Luftüberschusszahl (λ) normalerweise zwischen 1,7 und 2,0. Das entspricht einer Sauerstoffkonzentration im Abgas zwischen 9 und 11 Vol.-%. Eine zu starke Verbrennungsluftzufuhr hat die Kühlung der Flamme und somit eine Verschlechterung der Verbrennung zur Folge.
- Es muss sichergestellt werden, dass die Temperatur in der Brennkammer hoch genug ist, um das Brenngas aufoxidieren zu können. Die für eine gute Oxidation nötige Temperatur liegt, je nach Verweilzeit und Qualität der Durchmischung, zwischen 600 °C und 850 °C.
- Der in die Brennkammer zugeführte Sauerstoff muss sehr gut mit den Brenngasen durchmischt werden. Dabei spielt die Bauart der Brennkammer sowie die Art der Verbrennungsluftzufuhr eine große Rolle. Die Abgasviskosität steigt mit der Temperatur an, was zur Verschlechterung der Durchmischung führen kann.
- Die Brenngase müssen mit dem Sauerstoff für eine ausreichende Zeit in der Brennkammer verweilen und in Kontakt gebracht werden. Die minimale Verweilzeit der Brenngase in der Brennkammer hängt von der Mischung, der verfügbaren Sauerstoffmenge und der Temperatur ab. Bei einer Brennkammertemperatur von größer als 850 °C kann eine sehr gute Oxidation bei einer Verweilzeit von 0,5 Sekunden erreicht werden. Sinkt die Temperatur auf 600 °C, nimmt die notwendige Verweilzeit um 2 bis 4 Sekunden, ausgehend von den gleichen Durchmischungsverhältnissen, zu.

Die vier genannten Einflussgrößen hängen sehr stark voneinander ab. Nur bei einer optimalen Einstellung dieser Einflussgrößen kann eine emissionsarme Verbrennung gewährleistet werden [Marutzky 2002, Urban 2010].

3.2.2 Schadstoffbildung und primäre Reduktionsmöglichkeiten

Bei der thermochemischen Umsetzung von Festbrennstoffen entsteht eine Vielzahl völlig unterschiedlicher Schadstoffe. Diese Schadstoffe lassen sich in gas- und staubförmige Emissionen unterteilen. Abbildung 1 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Abbrandverhaltens bei der thermischen

Umwandlung biogener Brennstoffe mit den wichtigsten möglichen chemischen Reaktionen.

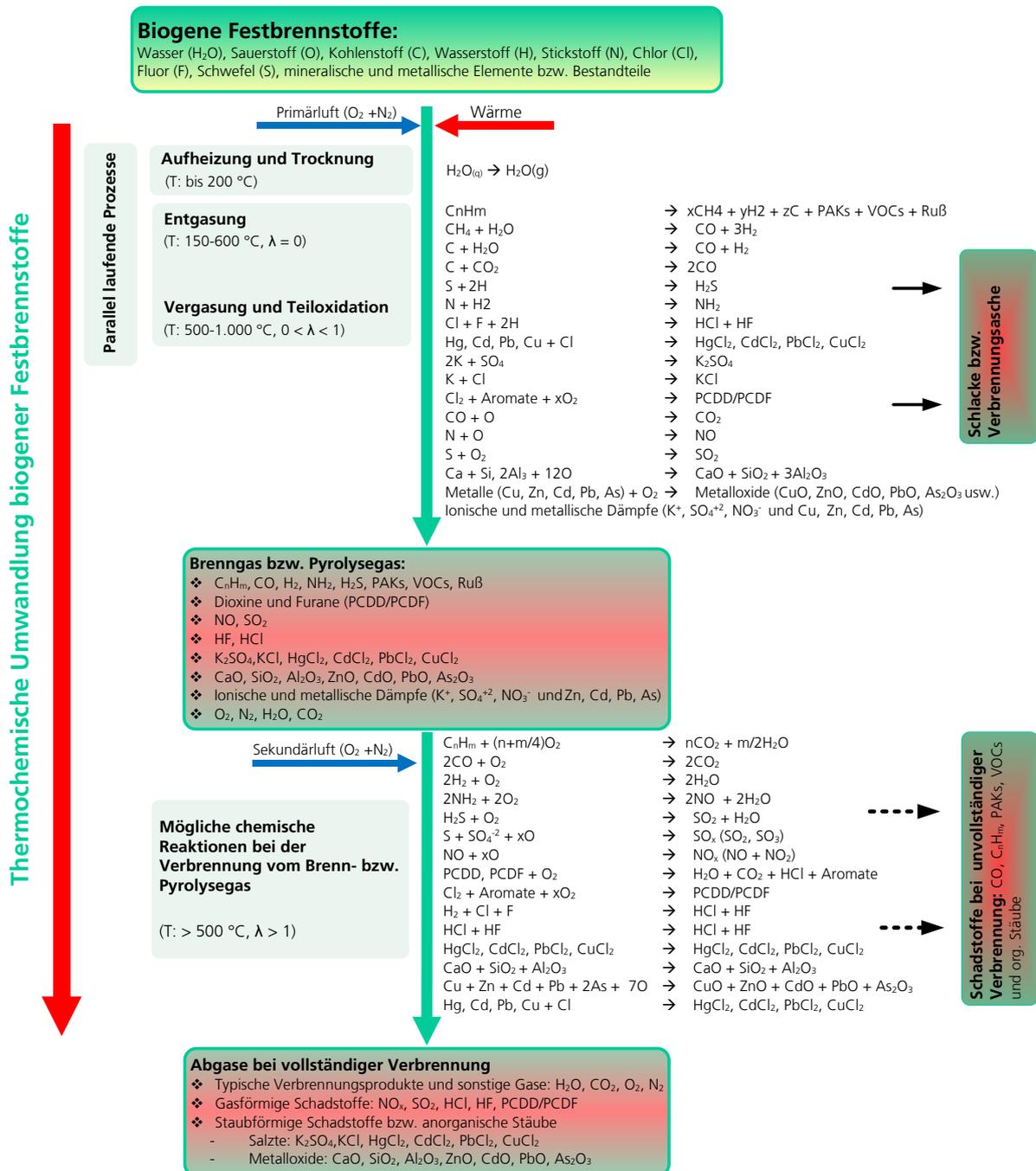


Abbildung 1: Vereinfachte Form für die thermische Umwandlung biogener Festbrennstoffe mit der Schadstoffbildung.

3.2.2.1 Schadstoffemissionen aus vollständiger Verbrennung

Zusätzlich zu typischen Verbrennungsprodukten (Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf) können bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz staub-

und gasförmige Schadstoffemissionen auf primäre und sekundäre Entstehungswege produziert werden.

Gasförmige Schadstoffe aus vollständiger Verbrennung:

Zu gasförmigen Schadstoffemissionen zählen im Allgemeinen Stickstoff-, Schwefel-, Chlor-, Fluor- und Kaliumverbindungen sowie Dioxine und Furane. Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz in Einzelraumfeuerungsanlagen sind nur die Stickstoffoxide von Bedeutung. In manchen Regionen in Deutschland wie z. B. in Regensburg sowie gemäß der europäischen gültigen Ökodesign-Richtlinie sind Grenzwerte für Stickstoffoxide bei der Verbrennung in Einzelraumfeuerungsanlagen festgelegt (siehe Tabelle 2 und Tabelle 5). Andere Abgasverbindungen (SO₂, HCl, HF und PCDD/PCDF) können nur zu einem sehr geringen irrelevanten Anteil produziert werden.

Staubförmige Schadstoffe aus vollständiger Verbrennung:

Staubförmige Emissionen aus vollständiger Verbrennung sind anorganische Bestandteile des Brennstoffs, die nach einer Fragmentierung und Verdampfung der Brennstoffpartikel bei sinkenden Temperaturen über die Nukleation mit anschließender Koagulation sowie durch die direkte Kondensation freigesetzt werden können, und mineralische Aschepartikel, die mit dem Rauchgasstrom aus dem Glutbett mitgerissen werden können. Hierzu zählen folgende Partikeltypen [Marutzky 2002, Kaltschmitt et al. 2009]:

- Schwerflüchtige, mineralische Aschebestandteile (z. B. CaO, Al₂O₃, SiO₂),
- Ascheverbindungen, die durch Verdampfung und Kondensation oder Neubildung in der Feuerung entstehen (z. B. KCl, K₂SO₄, Sulfate und Nitrate usw.),
- Schwermetalle und Schwermetallverbindungen aus dem Brennstoff oder aus Verunreinigungen. Diese können in metallischer, oxidischer oder chloridischer Form entstehen. Schwermetalle und Schwermetallverbindungen können bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz nur zu einem sehr geringen Anteil entstehen.

Die Konzentration von anorganischen Feinstäuben lässt sich in einer mehrstufigen Verbrennung reduzieren. In der ersten Verbrennungsstufe bzw. in der Vergasungszone muss die Temperatur niedriger eingestellt werden als die Verdampfungs- oder Mobilisierungstemperatur dieser Stäube. Außerdem tragen die Verteilung und Regulierung der Verbrennungsluft maßgeblich zur Reduzierung dieser Stäube bei. Dabei müssen günstige Strömungsverhältnisse in dem Glutbett gewährleistet werden, sodass diese Stäube durch die Begrenzung des Sauerstoffangebotes nicht entstehen können bzw. durch niedrige Strömungsgeschwindigkeiten in der Vergasungszone nicht mit dem Rauchgasstrom mitgerissen und anschließend emittiert werden. Zudem lässt sich der Anteil der schwerflüchtigen, mineralischen Aschebestandteile durch den Einsatz von rindefreien Hölzern bzw. mit Erde und Sand unbelasteten Hölzern sehr gut mindern [Marutzky 2002].

3.2.2.2 Schadstoffemissionen aus unvollständiger Verbrennung

Zusätzlich zu den Schadstoffemissionen aus vollständiger Verbrennung (siehe Abschnitt 3.2.2.1) können bei der unvollständigen Verbrennung von festen Brennstoffen folgende Schadstoffe produziert werden, welche auch in staub- und gasförmige Schadstoffemissionen zu unterteilen sind. Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung sind nicht nur gesundheitsgefährdend sowie klimarelevant, sondern auch energiereich (Kohlenstoffmonoxid: 2,8 kWh/kg, Propan: 12,9 kWh/kg, Methan: 13,7 kWh/kg, Ruß: 7,8 kWh/kg). Ihre Entstehung führt zur bedeutsamen Reduzierung der Verbrennungseffizienz.

Gasförmige Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung:

Kohlenstoffmonoxid und andere diverse Kohlenwasserstoffverbindungen, die bei der thermischen Zersetzung von Biomasse entstehen, stellen die typischen gasförmigen Schadstoffemissionen aus unvollständiger Verbrennung dar.

Kohlenstoffmonoxid ist ein farb- und geruchloses Gas, das sich 220-mal stärker an Hämoglobin bindet als Sauerstoff und die Sauerstoffversorgung des Körpers bis zum Eintritt des Todes beeinträchtigen kann [Lüllmann et al. 2003]. Kohlenstoffmonoxid kann durch eine unvollständige Oxidation von Kohlenstoff oder der Pyrolyseprodukte entstehen. Kohlenstoffmonoxid kann außerdem aus einer Rückreaktion vom Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoff bei höheren Temperaturen (Boudouard-Gleichgewicht) gebildet werden. Die Bildung kann sowohl durch endotherme als auch exotherme Reaktionen erfolgen, wobei der Abbau des Kohlenstoffmonoxids stark von der Temperatur abhängt. Die Kinetik ist bei Temperaturen > 800 °C bereits sehr hoch. Bei handbeschiedenen Feuerungsanlagen kann eine konstante Temperatur in diesem Temperaturbereich nicht immer gewährleistet werden, weshalb die Durchmischung der Abgase mit längeren Aufenthaltszeiten sehr entscheidend für den Oxidationsvorgang ist.

Die Schadwirkung der Kohlenwasserstoffverbindungen ist so vielfältig wie die verschiedenen Arten der Verbindungen, in denen sie auftreten können [Guderian 2000]. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um farblose Gase, die einen stark stechenden Geruch besitzen, Atemwege reizen und bis zur Bewusstlosigkeit führen können [Fuhrmann 1999]. Zu den Kohlenwasserstoffverbindungen zählen Alkohole, Aldehyde und zahlreiche organische Säuren [Lüllmann et al. 2003]. Von besonderer Relevanz sind in diesem Zusammenhang die polyzyklisch aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAKs). Bezüglich der Wirkung auf den anthropogenen Treibhauseffekt ist beispielsweise Methan durch ein 25-fach höheres Global-Warming-Potential (GWP) als CO₂ von besonderer Relevanz [Hesselbach 2010].

Staubförmige Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung:

Hierunter werden nicht verbrannte Kohlenstoffverbindungen verstanden, die kohlenstoffhaltige fest oder nach der Abkühlung der Reaktionsprodukte

entstehende Zersetzungsprodukte sowie kondensierte Syntheseprodukte umfassen [Marutzky 2002, Klippel et al. 2006].

Kohlenstoffhaltige Zersetzungsprodukte sind organische Verbindungen, die bei der pyrolytischen Zersetzung aufgrund des hohen Anteils an flüchtigen Bestandteilen im Brennstoff freigesetzt werden können. Ihre Bildung wird durch ungünstige Verbrennungsbedingungen wie z. B. ungenügend Sauerstoff, zu kurze Verweilzeiten, unzureichende Oxidationstemperatur im Brennraum und schlechte Durchmischung begünstigt.

Die kohlenstoffhaltigen kondensierten Syntheseprodukte, wie z. B. Ruß, werden in der Flamme durch Agglomeration kleinster Kohlenstoff-Cluster freigesetzt. Ihre Bildung wird durch ungenügende Luftzufuhr, ungleichmäßige Entzündung und schlechte Durchmischung von Brennstoff und Luft begünstigt.

Hinzu kommen auch organische Verbindungen, wie PAKs, die durch eine Synthese aus thermischen Zersetzungsprodukten bei hohen Temperaturen gebildet werden können [Marutzky 2002, Kaltschmitt et al. 2009].

Die staubförmigen Emissionen aus unvollständiger Verbrennung können durch die Verbesserung der Brennstoffeigenschaften wie z. B. beim Einsatz von trockenen Brennstoffen (Feuchtegehalt zwischen 12 Gew. % und 17 Gew. %) und/oder einer Stückigkeit, die an dem Brennstoffraum angepasst ist, sowie durch die Verbesserung der Feuerungstechnik erheblich gemindert werden. Für die Verbesserung der Feuerungstechnik können folgenden Maßnahmen umgesetzt werden:

- Kontinuierliche Beschickung: Bei chargenweise beschickten Feuerungsanlagen (wie bei Holzvergaserkesseln) findet aufgrund der Verbrennungskonstruktion eine intensive Trocknung bzw. eine intensive pyrolytische Zersetzung der gesamten im Brennstoffraum befindlichen Brennstoffmasse statt. Dadurch werden in der Anfahrbetriebsphase Brenngase mit schlechten Verbrennungseigenschaften freigesetzt. Dies führt zu hohen Konzentrationen organischer Feinstäube in der Anfahrbetriebsphase. Durch eine kontinuierliche Beschickung werden Brenngase mit ähnlicher Zusammensetzung und guten Verbrennungseigenschaften während des Betriebs bzw. Verbrennungsvorgangs produziert.
- Regelung der Primär- und Sekundärverbrennungsluftzufuhr durch den Einsatz einer O₂-Sonde oder CO_e/O₂-Sonde.
- Optimierung der Konstruktion (Form, Abmessungen und Werkstoffwahl) des Feuerraumes sowie der Verteilung der Primär- und Sekundärverbrennungsluft, sodass eine gute Durchmischung gewährleistet und kalte Zonen im Feuerraum vermieden werden können.
- Einsatz von Pufferspeicher, sodass die benötigte Energiemenge während des durchgängigen Betriebs der Feuerungsanlage bereitgestellt werden kann.

Stäube aus unvollständiger Verbrennung müssen definitiv durch Primärmaßnahmen gemindert werden, da sie einen erheblichen negativen Einfluss auf die nachgeschalteten Entstaubungssysteme haben. Diese Stäube können beispielsweise bei Elektroabscheidern eine klebrige Schicht auf den Sprühelektroden bilden, sodass die Ionisation und somit die Abscheideleistung gemindert wird. Zudem wird auf der Niederschlagselektrode aufgrund ihrer Leitfähigkeit eine Staubschicht mit schlechten elektrischen Eigenschaften gebildet, was das Rücksprühen von der Niederschlagselektrode zur Folge hat [Schwister 2009]. Bei Nassabscheidern bildet sich aus diesen Stäuben eine klebrige Schicht auf der Oberfläche des Wärmetauschers, den Innenwänden der Waschkammer und des Wasserführungssystems (Rohre, Ventile und Pumpen), was zu einer Störung des Betriebs führen kann. Die Problematik dieser Art von Stäuben besteht bei Abreinigungsfiltern in einer Erhöhung des Druckverlustes sowie in der Bildung einer Staubschicht, die eine schlechte Permeabilität bzw. Durchlässigkeit besitzt und sich nur schwierig abreinigen lässt.

Emissionen aus nicht vollständiger Verbrennung sind aus toxikologischer Sicht besonders relevant, da sie aufgrund der nicht vollständigen Verbrennung organische Substanzen enthalten, die eine hohe biologische Reaktivität aufweisen können [Klippel et al. 2006].

3.3 Überblick über Einzelraumfeuerungsanlagen und ihre betrieblichen Besonderheiten

In diesem Abschnitt werden die betrieblichen und konzeptionellen Besonderheiten der Einzelraumfeuerungsanlagen, der Einfluss des Schornsteins auf den Betrieb von Einzelraumfeuerungsanlagen in der Praxis sowie die Problematik in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen geschildert.

3.3.1 Betriebliche und konzeptionelle Besonderheiten von Einzelraumfeuerungsanlagen

Bei der Auslegung der Einbautentechnik spielen die Rahmen- und Betriebsbedingungen des Prozesses eine entscheidende Rolle. Im Folgenden sind die wichtigsten betrieblichen und konzeptionellen Besonderheiten von Einzelraumfeuerungsanlagen dargestellt und beschrieben (Abbildung 2):

Volumenstromschwankungen des Abgases während des Betriebs:

Während der Verbrennung in Einzelraumfeuerungsanlagen treten starke Volumenstromschwankungen auf. Der produzierte Abgasvolumenstrom ist aufgrund einer fehlenden automatischen Verbrennungsluftregelung stark von dem Förderdruck in der Abgasanlage abhängig. Es gilt, je höher der Förderdruck in der Abgasanlage, umso mehr Verbrennungsluft wird dem Feuerraum zugeführt und desto größer ist die produzierte Abgasmenge. Das hat großen Einfluss auf die Verweilzeit des Abgases und somit auf die Qualität der Verbrennung. Einzelraumfeuerungsanlagen

werden gemäß den Prüfnormen bei einem konstanten Förderdruck von 12 ± 2 Pascal und bestimmten Verbrennungslufteinstellungen geprüft. Dieser Förderdruck tritt im Praxisbetrieb nur selten auf. Je nach Schornsteinsystem (wirksame Höhe, Querschnitt usw.) und Witterungsverhältnissen (Außentemperaturen und Druckverhältnisse) können Unterdrücke in der Abgasanlage zwischen 8 Pascal und 80 Pascal erzeugt werden. In der Praxis werden mechanische Zugbegrenzer verwendet, um den Unterdruck im Kamin einigermaßen zu reduzieren bzw. im groben Bereich einzustellen. Im Abschnitt 3.3.2 sind die Einflüsse der Abgasanlage (Schornstein) ausführlich verdeutlicht.

**betriebliche,
verbrennungstechnische und
konzeptionelle Besonderheiten
der
Einzelraumfeuerungsanlagen
hinsichtlich der Auslegung von
integrierten Technologien zur
Schadstoffminderung**

- Volumenstromschwankungen des Abgases während des Betriebs
- Variierung der Beladungen des Abgases mit brennbaren staub- und gasförmigen Bestandteilen während der Verbrennung
- Schwankung der Mengen und der Verteilung des Sauerstoffs in der aktiven Reaktionszone während der Verbrennung
- Schwankungen der Druck- und Strömungsverhältnisse
- Temperaturschwankungen während der Verbrennung
- Anteil der anorganischen nicht oxidierbaren Bestandteile im Abgas

Abbildung 2: Betriebliche, verbrennungstechnische und konzeptionelle Besonderheiten von Einzelraumfeuerungsanlagen hinsichtlich der Auslegung von integrierten Technologien zur Schadstoffminderung.

Variierung der Beladungen des Abgases mit brennbaren staub- und gasförmigen Bestandteilen während der Verbrennung:

In der Anfahrbetriebsphase sowie Ausbrandphase ist grundsätzlich mit einer höheren Schadstoffbildung (bis 1,5 Vol.-% in der Anfahrbetriebsphase und 0,35 Vol.-% in der Ausbrandphase) zu rechnen als in der Regelbetriebsphase. In dieser Phase fehlen aufgrund des Chargenbetriebs die nötigen Temperaturen für eine vollständige Oxidation. Außerdem haben das Nutzerverhalten sowie die Brennstoffqualität und -art einen großen Einfluss auf die gesamte Verbrennungsqualität und somit auf die Schadstoffbeladung während der Verbrennung.

Schwankung der Menge und Verteilung des Sauerstoffs in der aktiven Reaktionszone während der Verbrennung:

Der Sauerstoffbedarf beim Chargenbetrieb variiert über die Betriebszeit. Die Verbrennungsluft wird nicht geregelt, sondern nur manuell gemäß den Angaben der Herstellerbedienungsanleitung fest eingestellt. Beim Chargenbetrieb ist der Sauerstoffbedarf oder –verbrauch nicht gleichmäßig. Direkt nach dem Auflegen der Holzscheite findet eine starke Vergasung der gesamten Brennstoffmenge statt. Das führt zu einem schnellen und hohen Sauerstoffverbrauch in dieser Phase, welche ca. 0,2 % bis 0,3 % der gesamten Abbranddauer ausmacht und in der die meisten Schadstoffe entstehen. Mit der Verbrennungszeit sinkt der Sauerstoffverbrauch aufgrund abnehmender Vergasungsintensität bzw. der Abnahme der produzierten Brenngasmenge. Der Betrieb mit hoher Lambda-Zahl (Sauerstoffüberschuss im Abgas) führt zur starken Kühlung der Flamme sowie des Feuerraums und somit zur Verschlechterung der Verbrennung.

Für eine sachgemäße Verbrennung ist nicht nur die Sauerstoffmenge sondern auch die Sauerstoffverteilung von großer Bedeutung. Die Sauerstoffverteilung in der aktiven Reaktionszone hängt von dem Verbrennungsluftzufuhrsystem ab. Hier spielen die Art der Primärluftzufuhr (als Rostluft oder Scheibenspülluft) sowie die Platzierung und die Verteilung der Sekundär- und Tertiärluftzufuhröffnungen eine entscheidende Rolle. Für eine günstige Sauerstoffverteilung und somit gute Mischung des Sauerstoffs mit den brennbaren Bestandteilen ist eine minimale Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsform im Feuerraumbereich sowie in der Nachoxidationszone (Nachoxidationskammer) erforderlich. Die Sauerstoffverteilung und –menge im Feuerraumbereich bestimmen die Gleichmäßigkeit, die Intensität und die Stabilität der Verbrennung, wobei die Vollständigkeit der Verbrennung in der Nachoxidationszone dadurch direkt beeinflusst wird. Eine gute Sauerstoffverteilung bei üblichen Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsverhältnissen in Einzelraumfeuerungsanlagen ist ohne weitere Maßnahmen wie z. B. der Einbautentechnik nur bedingt zu erreichen.

Druck- und Strömungsverhältnisse in Einzelraumfeuerungsanlagen:

Der Unterdruck in der Abgasanlage bestimmt die Menge sowie die Eintrittsgeschwindigkeit der Verbrennungsluft in den Feuerraum. Dadurch werden die Strömungsform und die Strömungsverhältnisse in der Feuerungsanlage bestimmt. Bei handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen, die bisher ohne automatische Steuerung oder Regelung sowie ohne jegliche Stromversorgung betrieben werden, haben die Druck- und Strömungsverhältnisse einen großen Einfluss auf die Verbrennungsqualität, Betriebsstabilität sowie auf die Betriebssicherheit im

Wohnbereich. Zusätzlich zur zugeführten Verbrennungsluftmenge wird die Verteilung des Sauerstoffs innerhalb des Feuerraums und in der Nachoxidationskammer direkt beeinflusst. Hoher Unterdruck in der Abgasanlage führt meistens zu einer intensiven, unkontrollierten Verbrennung mit hohem Schadstoffausstoß in der Startphase nach dem Holzauflegen bzw. nach der Holzbeschickung. In der Regelbetriebsphase und in der Ausbrandphase hat der hohe Unterdruck in der Abgasanlage, aufgrund der großen dem Feuerraum zugeführten Verbrennungsluftmenge, eine schnelle Abkühlung der Flamme und folglich eine Verschlechterung der Verbrennung zur Folge. Hohe Abgasgeschwindigkeiten führen zur Verkürzung der aktiven Verweilzeit und dadurch zu einer Verschlechterung der Verbrennung sowie der Effizienz.

Temperaturschwankungen während der Verbrennung:

Bei Einzelraumfeuerungsanlagen nimmt die Abgastemperatur mit der Höhe der Anlage aufgrund der Wärmeabgabe im Wohnraum sowie mit der Zeit wegen des Brennstoffverbrauchs während des Abbrandes ab, d. h. die aktive Verweilzeit (Reaktionszeit, in der sowohl ausreichend lokaler Sauerstoff als auch hohe Oxidationstemperaturen vorhanden sind) wird während der Verbrennung stark beeinflusst bzw. entsprechend verkürzt. Zur Verbesserung der Oxidation werden normalerweise Umlenkplatten eingesetzt. Die Umlenkung des Abgases erfolgt kurz nach dem Verlassen des Feuerraums. Dadurch wird die Durchmischung des Sauerstoffs mit den nicht verbrannten Bestandteilen verbessert und somit eine bessere Oxidation gewährleistet. Bei der Abgasumlenkmethode wird das Abgas mit der Zeit und der Strömungshöhe abgekühlt. Das hat zur Folge, dass die Oxidationsleistung entsprechend abnimmt bzw. ab einer bestimmten Höhe die Oxidation nicht mehr gewährleistet wird.

Das Diagramm 1 zeigt die Verläufe mittlerer Temperaturen im Feuerraum sowie in der Abgasanlage (Tripelpunkt) einer handbeschickten Biomassefeuerung. Es ist ersichtlich, dass die Temperatur mit der Höhe der Anlage sowie mit der Zeit während des Abbrandes abnimmt, d. h. die aktive Verweilzeit wird während der Verbrennung beeinflusst bzw. entsprechend verkürzt. Es ist zu erwähnen, dass die im Diagramm 1 dargestellten Temperaturkurven im Nennlastbetrieb ermittelt wurden. Im Überlastbetrieb ist mit höheren Temperaturen zu rechnen als im Nenn- oder Teillastbetrieb.

Für die Auslegung der Einbautentechnik werden die mittleren Temperaturen im Nennlastbetrieb zur Platzierung des Einbautenmoduls in der Feuerungsanlage berücksichtigt. Für die Auswahl eines geeigneten Einbautenmaterials sind hohe Abgastemperaturen zu berücksichtigen, welche in der Regel im Überlastbetrieb entstehen. Im Überlastbetrieb ist je nach zugeführter Verbrennungsluftmenge mit Abgastemperaturen im Feuerraumbereich von bis zu 1.100 °C zu rechnen. Bei diesen

Temperaturen sollte das Einbautenmaterial eine hohe thermische Dauerbeständigkeit aufweisen.

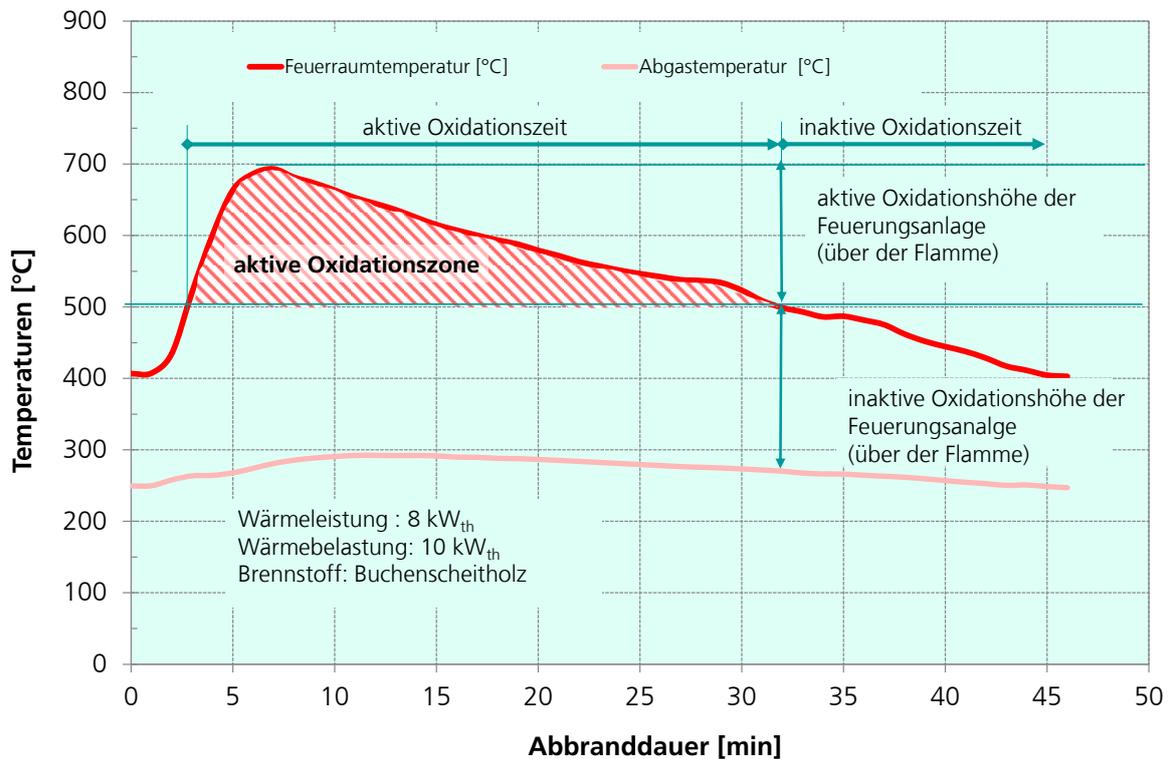


Diagramm 1: Verläufe mittlerer Temperaturen im Feuerraum sowie in der Abgasanlage (Tripelpunkttemperatur) einer handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlage im Nennlastbetrieb.

Anorganische Bestandteile im Abgas:

Bei der Verbrennung von festen Brennstoffen entstehen nicht nur organische Bestandteile sondern auch anorganische Komponenten, die sich thermisch nicht behandeln lassen. Besonders wichtig sind die staubförmigen anorganischen Bestandteile, welche sich auf oder in der Struktur des Einbautenmoduls absetzen und mit der Zeit zu hohen Strömungswiderständen bzw. Druckverlusten in der Feuerungsanlage führen. Hierbei hat die Architektur der Struktur eine besondere Bedeutung. Die beim Betrieb von Einzelraumfeuerungsanlagen entstehenden staubförmigen Emissionen bestehen zum großen Teil (> 95 %) aus organischen Feinstäuben (< 1 µm). Solche Stäube lassen sich mechanisch, ohne weitere Konditionierung, durch die Filtration oder Sedimentation nicht abscheiden. Grobe Flugasche entsteht bei der Verbrennung in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen nur zum geringen Teil. Bei hohem Abgasförderdruck und direkt durchströmtem Glutbett ist mit erhöhtem Ascheanteil im Abgas zu rechnen. Bei feinen nicht-deterministischen Strukturen führt die hohe Aschebelastung zur Blockierung der Abgaswege und folglich zur Erhöhung des Druckverlustes.

3.3.2 Einfluss des Schornsteins auf den Betrieb der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen in der Praxis

Um eine Einzelraumfeuerungsanlage gemäß DIN EN 13240, DIN EN 13229 oder DIN EN 15250 problemlos und optimal betreiben zu können, muss zwangsläufig das Abgasabfuhrsystem bzw. der Schornstein mit betrachtet werden. Zwischen dem Schornstein und der daran angeschlossenen Feuerstätte besteht eine starke Wechselwirkung, welche einen großen Einfluss auf die Funktion des Gesamtsystems (Feuerstätte/Schornstein) und folglich auf die Verbrennungsqualität sowie die Verbrennungseffizienz hat. Bei Feuerstätten wie z. B. handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen, die bisher ohne Regelung bzw. Steuerung betrieben werden, ist der Einfluss des Schornsteins auf den Betrieb von großer Bedeutung. Diese Wechselwirkung zwischen Schornstein und Feuerungsanlage wird bisher sowohl bei Entwicklungs- und Forschungsarbeiten, als auch in der gängigen Praxis nicht ausreichend berücksichtigt. Das Hauptaugenmerk bei der Behandlung der Emissionsproblematik wird in der Regel auf die Verbesserung des Verbrennungsverhaltens der Feuerungsanlage ohne Berücksichtigung des Einflusses des Abgasabfuhrsystems auf den Betrieb gelegt.

Die Wechselwirkung zwischen dem Abgasabfuhrsystem und der Feuerstätte verstärkt sich während des Betriebs. Infolge der zugeführten Wärme aus der Verbrennung haben Abgase eine höhere Temperatur als die Außenluft. Innerhalb des Schornsteins entstehen variierende Auftriebskräfte, die den Abtransport der Abgase bewirken und einen schwankenden Unterdruck im Schornstein sowie in der Feuerstätte erzeugen. Dabei spricht man von sogenannten Naturzugsystemen, bei denen die Druckverhältnisse in der Feuerstätte über den gegenwärtigen Unterdruck im Schornstein beeinflusst werden. Hier soll durch die Konstruktion der Feuerstätte oder Strömungsregler eine Strömungsstabilisierung unabhängig von Unterdruckschwankungen gewährleistet werden, sodass sowohl die Verbrennungsluftzufuhr als auch die Abgasabfuhr sichergestellt wird.

Für eine optimale Auslegung und einen sachgemäßen Betrieb einer Feuerstätte sollen alle am Verbrennungsprozess beteiligten Komponenten im Rahmen eines Gesamtsystems konzeptionell und konstruktiv berücksichtigt werden. Eine moderne Feuerstätte ist nur in Verbindung mit einem geeigneten Schornsteinsystem emissionsarm und effizient zu betreiben. Hierbei ist es außerordentlich wichtig, dass die Komponenten wie Feuerungsanlage, Verbindungstück und Schornstein aufeinander abgestimmt werden, ansonsten sind langfristig keine stabilen Betriebsverhältnisse erzielbar. Darüber hinaus können Planungsfehler Problematiken wie z. B. eine unvollständige Verbrennung sowie Verrußung von Feuerstätte und Schornstein mit der Gefahr eines unkontrollierten Rußbrandes hervorrufen. Des Weiteren besteht bei falscher Auslegung, wie z. B. durch Abgasaustritt aus der Feuerstätte, eine Gefährdung für die Nutzer. Die zur sicheren Funktion von Feuerungsanlagen erforderlichen Druck- und Temperaturbedingungen sind in der Norm DIN EN 13384-1-3 beschrieben (Abbildung 3, links).

Der Einfluss des Schornsteins auf die Verbrennung in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen wurde im Rahmen der Forschungs- und Prüfaktivitäten des Fachgebiets Verbrennungssysteme im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP untersucht. Dabei wurden der Einfluss der Mehrfachbelegung sowie die Betriebshöhe auf den Betrieb (Verbrennungseffizienz sowie Verbrennungs- und Emissionsverhalten) drei identischer handbeschickter Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß DIN EN 13240 für die drei folgende Betriebsszenarien untersucht.

- Betriebsszenario A: Wenn sich alle drei Einzelraumfeuerungsanlagen in Betrieb befinden,
- Betriebsszenario B: Wenn nur die oberste Einzelraumfeuerungsanlage in Betrieb ist,
- Betriebsszenario C: Wenn nur die unterste Einzelraumfeuerungsanlage betrieben wird.

Bei diesen Untersuchungen wurde ein handelsüblicher Schornstein für einen raumluftunabhängigen Betrieb eingesetzt. Abbildung 3, rechts, zeigt den verwendeten Versuchsaufbau. Die eingesetzten Einzelraumfeuerungsanlagen sind gemäß DIN EN 13240 geprüft und erfüllen die Anforderungen an raumluftunabhängige Feuerstätten für feste Brennstoffe nach den Zulassungsgrundsätzen des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBT.

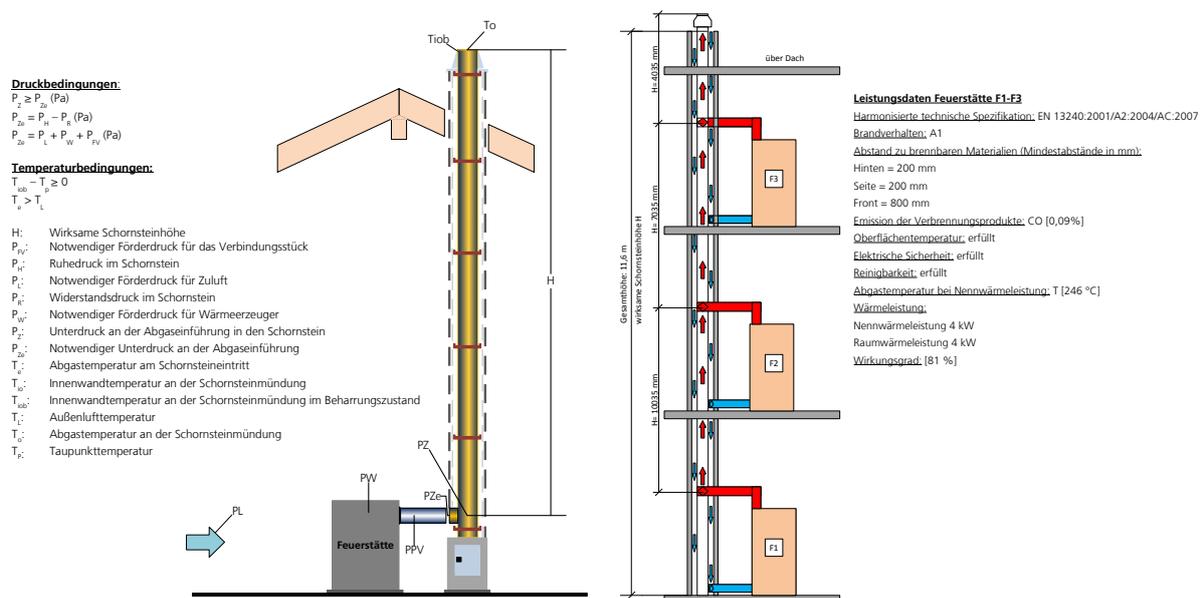


Abbildung 3: Druck- und Temperaturbedingungen nach DIN EN 13384 (links), Versuchsaufbau des mehrfach belegten Luft-Abgas-Schornsteins LAS (rechts), sowie die Leistungsdaten der verwendeten Feuerstätten.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die Einzelraumfeuerungsanlagen entsprechend den Angaben der Typprüfung bzw. der Bedienungs- und Aufstellanleitung des Herstellers betrieben. Bei dem Nennwärmeleistungsbetrieb sollen gemäß den Angaben des Herstellers 1,5 kg

Buchenscheitholz, aufgeteilt in 2 Scheite pro Auflage beschickt werden. Diese sollen unter Prüfbedingungen ca. 45 Minuten brennen.

Im Folgenden sind die Untersuchungsergebnisse der oben erwähnten Betriebsszenarien zusammengefasst und in der Tabelle 6 dargestellt.

Betriebsszenario A: Alle drei Einzelraumfeuerungsanlagen in Betrieb

Bei dem Betriebsszenario A wurden alle drei Einzelraumfeuerungsanlagen gleichzeitig betrieben bzw. gezündet. Eine Neubeschickung der drei Einzelraumfeuerungsanlagen erfolgte während der Versuchsreihe am Ende eines Chargenabbrands innerhalb eines Zeitraums von ca. 4 Minuten.

Der Tabelle 6 ist zu entnehmen, dass der Förderdruck (gemessen in den Verbindungsstücken der jeweiligen Einzelraumfeuerungsanlage) mit der zunehmenden aktiven Höhe des Schornsteins ansteigt, wodurch ein Förderdruck in der untersten Einzelraumfeuerungsanlage von 41 Pascal, in der mittleren von 29 Pascal und in der obersten Einzelraumfeuerungsanlage von 19 Pascal gemessen wurde.

Der Abgasförderdruck beeinflusst sowohl das Verbrennungs- als auch das Emissionsverhalten. Hohe Abgasförderdrücke führen zur Zufuhr großer Verbrennungsluftmengen in den Verbrennungsprozess. Dadurch wird die Verweilzeit in der aktiven Reaktionszone verkürzt sowie die Feuerungsanlage bzw. die Flamme so stark abgekühlt, sodass hohe Konzentrationen nicht verbrannter staub- und gasförmiger Schadstoffe gebildet und emittiert werden. Die CO-Konzentrationen nehmen von der untersten Einzelraumfeuerungsanlage bis zur obersten Einzelraumfeuerungsanlage von 0,22 Vol.-% auf 0,18 Vol.-% ab. Außerdem führt der hohe Förderdruck zu hohen Abgastemperaturen und somit zur Verschlechterung des Wirkungsgrades, sodass in der untersten Einzelraumfeuerungsanlage mit einer Abgastemperatur von 286 °C ein Wirkungsgrad von 63 %, in der Einzelraumfeuerungsanlage in der mittleren Ebene mit einer Abgastemperatur von 282 °C ein Wirkungsgrad von 70 % und in der obersten Einzelraumfeuerungsanlage mit einer Abgastemperatur von 257 °C ein Wirkungsgrad von 73 % erreicht worden ist.

Betriebsszenario B: Betrieb der obersten Einzelraumfeuerungsanlage

Im Betriebsszenario B wurde nur die oberste Einzelraumfeuerungsanlage in Betrieb genommen. Bei den anderen Einzelraumfeuerungsanlagen wurde die Verbrennungslufteinstellung auf die niedrigste Stufe gestellt.

Im Vergleich zum Betrieb gemäß Betriebsszenario A gab es bemerkbare Unterschiede hinsichtlich der Emissionswerte. Das liegt auch an der Erhöhung des Förderdrucks von 19 Pascal auf 21 Pascal.

Durch diese Erhöhung (ca. 11 %) steigen die CO-Konzentrationen in diesem Szenario auf 0,21 Vol.-% an. Das entspricht einer Erhöhung der CO-Emissionen um ca. 17 %.

Tabelle 6: Ergebnisse der Betriebsszenarien im Nennlastbetrieb.

Parameter		Messwerte im Nennlastbetrieb				
Aufbauebene der Feuerstätte		F1 H=10m	F2 H=7m	F3 H=4m	4 (Unter Dach)	5 (Über Dach)
Auflage-Masse	kg	1,5	1,5	1,5	–	–
Betriebsszenario A: Alle drei Einzelraumfeuerungsanlagen in Betrieb						
Wärmeleistung	kW	5,7	6,2	6,0	–	–
Abgasmassenstrom	g/s	11,4	9,2	8,4	–	–
Wirkungsgrad	%	63	70	73	–	–
Abgastemperatur	°C	286	282	257	–	–
CO ₂	Vol.-%	5,3	6,5	6,5	–	–
CO im Vergleichszustand	Vol.-%	0,22	0,20	0,18	–	–
Förderdruck	Pa	41	29	19	–	–
Abbrandzeit (je Auflage)	h	0,79	0,81	0,84	–	–
Druck/Luftschacht	Pa	11	9	7	–	–
Umgebungstemperatur	°C	22,8	26,6	27,8	–	17,6
Betriebsszenario B: Betrieb der obersten Einzelraumfeuerungsanlage						
Wärmeleistung	kW	–	–	6,1	–	–
Abgasmassenstrom	g/s	–	–	8,6	–	–
Wirkungsgrad	%	–	–	71	–	–
Abgastemperatur	°C	21,1	22,0	265	–	–
CO ₂	Vol.-%	–	–	6,0	–	–
CO im Vergleichszustand	Vol.-%	–	–	0,21	–	–
Förderdruck	Pa	19	20	21	–	–
Abbrandzeit (je Auflage)	h	–	–	0,84	–	–
Druck/Luftschacht	Pa	10	10	11	–	–
Umgebungstemperatur	°C	21,7	22,6	25,4	–	12,1
Betriebsszenario C: Betrieb der untersten Einzelraumfeuerungsanlage						
Wärmeleistung	kW	5,5	–	–	–	–
Abgasmassenstrom	g/s	11,1	–	–	–	–
Wirkungsgrad	%	65	–	–	–	–
Abgastemperatur	°C	279	–	–	–	–
CO ₂	Vol.-%	5,3	–	–	–	–
CO im Vergleichszustand	Vol.-%	0,20	–	–	–	–
Förderdruck	Pa	34	22	16	–	–
Abbrandzeit (je Auflage)	h	0,84	–	–	–	–
Druck/Luftschacht	Pa	11	9	8	–	–
Umgebungstemperatur	°C	23,0	25,7	24,1	–	5,3

Der Wirkungsgrad bei diesem Betriebsszenario ist aufgrund des erhöhten Förderdrucks von 73 % auf 71 % gesunken. Die Abgastemperatur ist von 257 °C auf 265 °C angestiegen.

Betriebsszenario C: Betrieb der untersten Einzelraumfeuerungsanlage

Im Betriebsszenario C wurde nur die unterste Einzelraumfeuerungsanlage betrieben. Bei den beiden anderen Einzelraumfeuerungsanlagen wurde die Verbrennungslufteinstellung auf die niedrigste Stufe gestellt.

Im Vergleich zum Betrieb gemäß Betriebsszenario A gab es in der untersten Einzelraumfeuerungsanlage merkbare Unterschiede hinsichtlich der Emissionswerte. Der Abgasförderdruck wurde bei diesem Betriebsszenario von 41 Pascal auf 34 Pascal gesenkt. Durch diese Reduzierung des Förderdrucks (ca. 17 %) sind die CO-Konzentrationen in diesem Betriebsszenario auf 0,20 Vol.-% gesunken. Diese Reduzierung entspricht einer Minderung der CO-Konzentration von ca. 9 %. Der Wirkungsgrad in diesem Betriebsszenario war aufgrund des niedrigeren Förderdrucks bzw. der längeren Verweilzeit in der Einzelraumfeuerungsanlage höher als bei dem Betriebsszenario A, wodurch sowohl eine bessere Oxidation als auch eine höhere Wärmeabgabe im Prüfraum stattgefunden hat. Die Abgastemperatur bei diesem Betriebsszenario war um 7 °C niedriger als bei dem Betriebsszenario A.

Anhand der oben dargestellten drei Betriebsszenarien (A, B und C) lässt sich deutlich erkennen, dass das Abgasabfuhrsystem bzw. der Schornstein einen enormen Einfluss auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten von handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen hat, welche bisher ohne jegliche Regelung oder Steuerung der Verbrennungsluftzufuhr betrieben werden. Der Unterdruck in der Feuerungsanlage bzw. der Förderdruck im Schornstein hat einen direkten Einfluss auf die zugeführte Verbrennungsluftmenge und verursacht meistens ungünstige Strömungen und folglich eine schlechtere Verbrennung. Um den Einfluss des Förderdrucks im Praxisbetrieb zu minimieren, sollten entsprechende Maßnahmen zur Strömungsstabilisierung in Einzelraumfeuerungsanlagen umgesetzt werden. Eine Strömungsstabilisierung lässt sich entweder durch eine feine Regelung oder durch integrierte Technologien wie z. B. die Einbautentechnik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP erreichen, welche im Rahmen dieser Arbeit ausführlich erforscht wird.

3.3.3 Problematiken in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen

Für eine vollständige Verbrennung ist eine wirksame Temperatur und ausreichend lokaler Sauerstoff nötig. Die brennbaren gasförmigen Bestandteile müssen in der aktiven Reaktionszone (Zone mit ausreichend hoher Temperatur und lokalem Sauerstoff) für eine bestimmte Zeit verweilen, sodass sie vollständig oxidiert werden können. Diese Zeit wird als aktive Verweilzeit bezeichnet. Die unten aufgeführten Parameter (wirksame Temperatur, lokaler Sauerstoff und ausreichend aktive Verweilzeit) sollten zu jedem Zeitpunkt des Verbrennungsprozesses ausreichend gewährleistet sein, sonst entsteht eine unvollständige Verbrennung mit diversen staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen (Abbildung 4).

Ausgehend von dem Stand der Technik der handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen werden die oben erwähnten Verbrennungsparameter im Praxisbetrieb nur bedingt eingehalten. Es müssen sowohl konstruktive als auch konzeptionelle Maßnahmen ergriffen werden, um eine ökologische und ökonomische Verbrennung erreichen zu können.

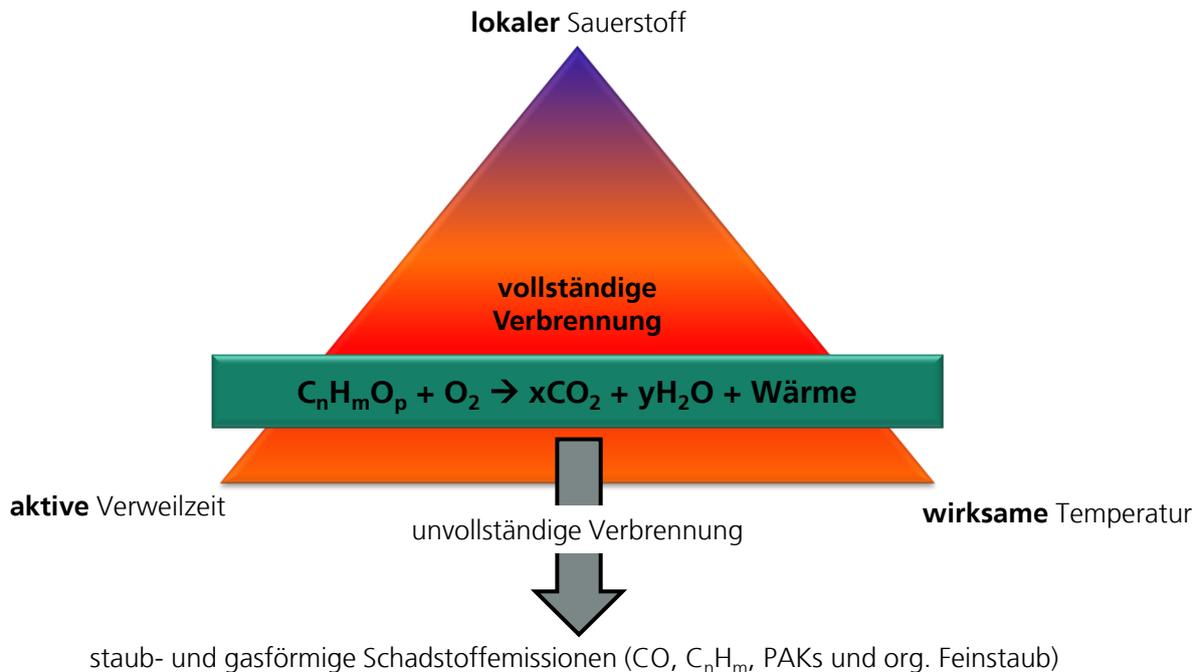


Abbildung 4: Parameter für die Verbrennung.

Handbeschickte biomassebetriebene Einzelraumfeuerungsanlagen werden bisher aus vermarktungs- und wirtschaftlichen Gründen ohne Stromversorgung sowie ohne jegliche Art automatischer Steuerung oder Regelung betrieben. Daher ist der Einfluss des Betreibers auf das Verbrennungs- und somit auf das Emissionsverhalten sehr ausschlaggebend. Zusätzlich können handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen nur unter speziellen Betriebsbedingungen eine emissionsarme Verbrennung gewährleisten, welche meistens durch die Hersteller im Rahmen der Entwicklung oder bei der Typprüfung festgelegt und in der Bedienungs- und Aufstallanleitung der Feuerungsanlagen angegeben werden und von den Nutzern in der Praxis eingehalten werden sollen. Zusätzlich zum Abgasabfuhrsystem (siehe Abschnitt 3.3.2) hat der Nutzer, bei solchen bisher nicht intelligenten Feuerungsanlagen, sowohl durch die Auswahl des Brennstoffs als auch durch die technische Bedienung einen großen Einfluss auf den Betrieb. Im Folgenden sind die wichtigsten von dem Nutzer ausgehenden Einflussfaktoren auf den Betrieb von handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen dargestellt:

- Beschickungsregime der Feuerungsanlage,
 - Brennstoffauswahl (Art und verbrennungstechnische Eigenschaften - vor allem Feuchtegehalt),
 - Brennstoffmenge pro Auflage,
 - Anzahl, Größe, Länge und Form der beschickten Holzscheite,
 - Zeitpunkt und Dauer der Beschickung,
 - Ordnung bzw. Stapelung der Holzscheite im Feuerraum usw.
- Einstellung der Verbrennungsluft und des Naturzugs.
- Wartung und Pflege der Feuerungsanlage.

In der Praxis werden die Betriebsangaben des Herstellers durch die Nutzer nur bedingt eingehalten, wodurch sich ein sachgemäßer (emissionsarmer und effizienter) Betrieb nur bedingt erreichen lässt. Fehlbedienungen der Einzelraumfeuerungsanlagen haben eine unvollständige Verbrennung und somit erhöhte Schadstoffemissionen in Wohngebieten (besonders urbane Räume) zur Folge.

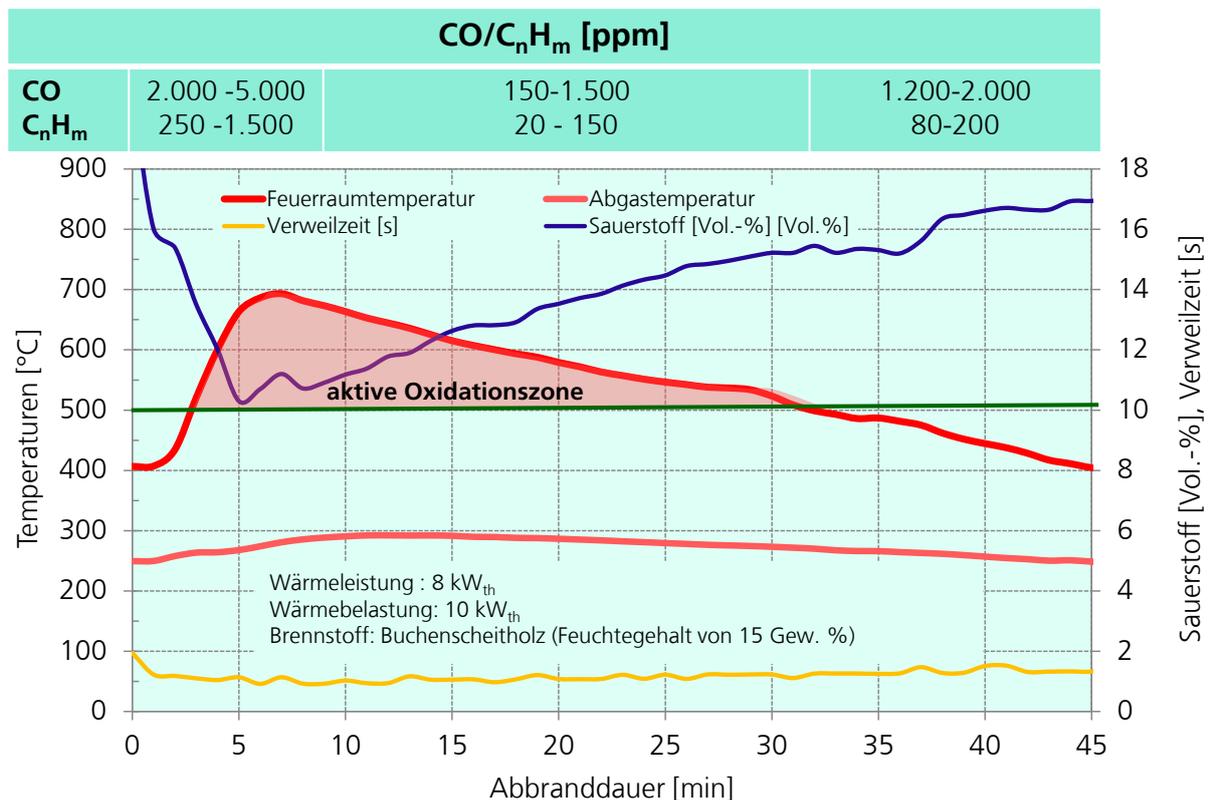


Diagramm 2: Feuerraum- und Abgastemperaturen, Verweilzeit und Sauerstoff bei einer handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß DIN EN 13240.

Um wissensbasierte Maßnahmen und Technologien zur Verbesserung des Emissions- und Verbrennungsverhaltens in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen zu entwickeln, wurde im Rahmen der Forschungs- und Prüftätigkeiten des Fachgebiets Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP die Problematik in handbeschickten

biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen durch intensive Untersuchungen mehrerer handelsüblicher Einzelraumfeuerungsanlagen systematisch erforscht. Diagramm 2 zeigt die Verläufe der mittleren Werte des Sauerstoffs (gemessen im Abgas), der Temperaturen im Feuerraumbereich (nach der Sekundärluftzugabe bzw. vor der Oxidationskammer), der Abgastemperatur in dem Abgasstutzen und der berechneten Verweilzeit an. Es ist zu erwähnen, dass die Abgastemperatur im Feuerraumbereich die mittleren Temperaturen einer Netzmessung (12 Messpunkte) über den gesamten Querschnitt des Feuerraums darstellen. Im Flammenbereich sowie im Kern des Abgasstroms wurden höhere Temperaturen bis 920 °C ermittelt.

Anhand des Betriebs der oben erwähnten Einzelraumfeuerungsanlagen wurden folgende Erkenntnisse und Erfahrungen erworben, welche auch dem Stand der Technik der Einzelraumfeuerungsanlagen entsprechen:

- Trotz ausreichend hoher Temperaturen im Feuerraumbereich und genügend hohen Sauerstoffkonzentrationen im Abgas (Luftüberschusszahl bzw. Lambda zwischen 1,8 und 4,0) fand eine unvollständige Verbrennung (Diagramm 2, Verbrennungszeit zwischen Minute 5 und Minute 10) statt. Eine Abgasverweilzeit in einer aktiven Reaktionszone von ca. 1,8 Sekunden sollte für eine vollständige Oxidation sowohl von staub- als auch gasförmigen Emissionen ausreichend sein. Die unvollständige Verbrennung ist auf eine ungünstige Sauerstoffverteilung zurückzuführen.
- In der Startphase findet eine sehr intensive Verbrennung mit hohen Temperaturen (bis 920 °C) und hohem Ausstoß an Schadstoffemissionen wie z. B. Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Feinstaub (Diagramm 2, Verbrennungszeit zwischen Minute 5 und Minute 10) statt. Je intensiver die Verbrennung in der Startphase erfolgt, umso schlechter ist die Verbrennungsqualität in den Regel- und Ausbrandbetriebsphasen.
- Im Feuerraumbereich war die Verteilung der Temperaturen über den gesamten Querschnitt sehr ungleichmäßig. Dort haben die Abgastemperaturen während des Betriebs zwischen 380 °C und 920 °C fluktuiert. Je ferner der Messpunkt vom Kern des Abgasstroms liegt, desto niedriger sind die Abgastemperaturen.
- Direkt nach der Beschickung (Diagramm 2, Verbrennungszeit zwischen Minute 0 und Minute 3) sowie am Ende der Regelbetriebsphase (Diagramm 2, Verbrennungszeit zwischen Minute 33 und Minute 45) kann das nötige Temperaturniveau (< 500 °C) für die thermische Oxidation nicht gewährleistet werden.
- Es wurde beobachtet, dass die kleinste Änderung des Naturzugs bzw. des Unterdrucks in der Abgasanlage einen großen Einfluss auf die Verbrennungsqualität sowie auf die Effizienz der Feuerungsanlage hat. Der Einfluss des Förderdrucks auf die Qualität der Verbrennung in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen wird in Kapitel 3.3.2 (Einfluss des Schornsteins auf den Betrieb der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen) ausführlich erläutert.

Die oben geschilderten wertvollen Erkenntnisse und Erfahrungen haben eine wichtige wissenschaftliche und praktische Grundlage über den Betrieb von Einzelraumfeuerungsanlagen zur zielführenden Entwicklung der Einbautentechnik geliefert, welche im Rahmen dieses Projekts unter Berücksichtigung praktischer Bedingungen erforscht wurde. Die Forschungsstrategie des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP beruht auf der Entwicklung von Schadstoffminderungstechnologien unter Berücksichtigung der oben geschilderten Besonderheiten der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen, welche den Einfluss des Nutzers auf die Verbrennungsqualität mindern und sich ohne Widerspruch mit den Angaben jeweiliger Prüfnormen in unterschiedlichen Feuerungsanlagen integrieren lassen.

3.4 Integrierbare Technologien zur Abgasbehandlung in Einzelraumfeuerungsanlagen

In diesem Abschnitt werden nur Technologien vorgestellt, die im Feuerraumbereich als konstruktive und primäre Maßnahmen zur Schadstoffminderung einsetzbar sind. Alle Abgasbehandlungstechnologien, die nach dem Wärmeaustausch in die Feuerungsanlage integriert werden, sind als kombinierte oder nachgeschaltete Sekundärmaßnahmen zu bezeichnen.

Integrierbare Technologien zur Abgasbehandlung in Kleinf Feuerungsanlagen kommen gemäß dem Stand der Technik als Filtrations- und Oxidationsverfahren zum Einsatz. Diese Verfahren werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.4.1 Filtrationsverfahren

Die bisher verbreiteten Filtrationsverfahren basieren auf dem Abscheideprinzip von Oberflächen- oder Speicherfiltern. Dabei werden die Stäube mechanisch durch Sperrn oder Sedimentation abgeschieden. Als Filterstruktur werden Materialschüttungen (Granulate), Schaumkeramik (in der Regel Nichtoxidkeramik) oder hochtemperaturbeständige Gewebe (Faser) verwendet. Auf und in der Filterstruktur sollen die staubförmigen Schadstoffe abgeschieden und beim Erreichen günstiger Temperaturen freigebrannt werden. Die anorganischen Bestandteile lagern sich in der Struktur ab. Das führt aufgrund der Zunahme des Strömungswiderstands zur Notwendigkeit einer ständigen manuellen Reinigung der Struktur. Das Filtrationsverhalten hängt von vielen Faktoren ab wie z. B. der Geometrie, der Porengröße und der Filterflächenbelastung.

Im Rahmen eines von dem Fachgebiet Verbrennungssysteme erfolgreich abgeschlossenen Forschungsprojekts über die Korrelation der Filter-Reaktor-Architektur von Abscheidesystemen wurde eine Schaumstruktur aus Nichtoxidkeramik mit unterschiedlichen Porengrößen (3 x 10 ppi, 10 ppi und 20 ppi) untersucht [Aleysa et al. 2015]. Die Problematik bei solchen Strukturen (Schüttung, Drahtgestrick oder Schaumkeramik) liegt darin, dass eine schnelle Verstopfung beim Einsatz ungünstiger Brennstoffe oder bei

niedrigem Unterdruck in der Abgasanlage erfolgt (Abbildung 5, unten). Dies tritt bei Granulat-Schüttungen schneller auf als bei der Schaumkeramikstruktur, da die Schaumkeramikstruktur über einen größeren Porenanteil ($> 70\%$) als die Granulat-Schüttung ($< 35\%$) verfügt. Das führt dazu, dass die Filterplatten oder Filterkassetten meistens im Praxisbetrieb durch die Nutzer ausgebaut und die Feuerungsanlagen ohne die Filtereinrichtung weiterbetrieben werden. Zusätzlich dazu zeigt die Schaumstruktur aus Nichtoxidkeramik aufgrund der ständigen und großen Temperaturwechsel während des Betriebs keine hohe mechanische Stabilität. Nichtoxidkeramik kennzeichnet sich durch geringe Duktilität und hohe Sprödigkeit aus. Im Praxisbetrieb der Einzelraumfeuerungsanlagen können die Schaumkeramikplatten bei der Reinigung durch die Nutzer beschädigt bzw. zerbrochen werden. Aufgrund fehlender rechtlicher Überwachungs- bzw. Austauschregelung werden die Filterplatten anschließend nicht mehr ersetzt. Gemäß den Praxiserfahrungen werden die Betriebsangaben der Hersteller (wie z. B. Auflagerregime, Wartungsintervalle, Lufteinstellung, Filteraustausch usw.) vom Anlagenbetreiber nicht berücksichtigt. In Abbildung 5 ist eine Schaumkeramikstruktur mit einer Lochgröße von 10 ppi dargestellt.



Abbildung 5: Schaumkeramik-Filterplatten im Neuzustand (links), nach zwei Betriebstagen (ca. 14 h) (rechts).

Gemäß den Prüfnormen soll bei der Integrierung solcher Filtersysteme (auch Katalysatoren) in die Feuerungsanlage eine minimale freie Strömungsfläche von 20 cm^2 wegen vorhersehbarer Verstopfungsgefahr belassen und das Filtersystem (Platten oder Kassetten) zugänglich bzw. leicht abmontierbar für die Reinigung oder den Austausch aufgebaut werden. Das kann dazu führen, dass eine Manipulierung durch die Nutzer im Praxisbetrieb möglich wird und eine Umströmung der Struktur beim Ansteigen des Strömungswiderstands auftritt, sodass die Filterfunktion nicht mehr gewährleistet werden kann.

3.4.2 Oxidationsverfahren

Bei den Oxidationsverfahren ist zwischen katalytischen und thermischen Verfahren zu unterscheiden. In den letzten Jahren wurden viele katalytische Verfahren für den Einsatz in biomassebetriebenen Kleinf Feuerungsanlagen entwickelt und eingesetzt. Thermische Oxidationsverfahren wurden erst im Rahmen von Untersuchungen im Fachgebiet Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP entwickelt und im Rahmen dieses

Projekts erforscht. Sie besitzen ein hohes Potential für eine sichere und nachhaltige Schadstoffminderung und gewährleisten eine bedeutsame Effizienzerhöhung. Im Folgenden werden die katalytischen und thermischen Oxidationsverfahren und deren Wirkmechanismen genauer erläutert.

3.4.2.1 Katalytische Oxidationsverfahren

Bei den katalytischen Oxidationsverfahren wird das Abgas in die katalytisch beschichtete Struktur (Granulat-Schüttung, Schaumstruktur aus Oxid- und Nichtoxidkeramik, Waben, Drahtgewebe bzw. Drahtgestrick) geleitet. Die im Abgas enthaltenen, brennbaren Schadstoffe wie z. B. Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (C_nH_m , VOCs, PAKs) kommen mit der katalytisch-aktiven Oberfläche des Katalysators in Kontakt. In Anwesenheit von Sauerstoff können die Oxidationsreaktionen durch den Katalysator bereits bei einer Temperatur größer als 300 °C stattfinden. Diese Schadstoffe werden durch Oxidation in Stoffe wie Wasser und Kohlendioxid überführt und dadurch toxikologisch gemildert. Der Katalysator nimmt an den Reaktionen nicht teil bzw. wird im Zuge der Oxidation nicht verbraucht. Er gewährleistet lediglich, dass die Reaktionen bei einem niedrigeren Temperaturniveau (schon bei 300 °C statt bei 500 °C) stattfinden können.



Abbildung 6: Katalysator aus beschichtetem Granulat nach drei Betriebstagen (ca. 21 h).

Jeder Katalysator unterliegt einem Alterungsprozess, sodass die Aktivität des Katalysators mit der Zeit abnimmt. Ursachen hierfür sind beispielsweise Stäube, die bei Ablagerungen am oder im Katalysator die aktive Oberfläche verkleinern oder die katalytische Schicht durch ihre scharfkantige Geometrie abtragen. Katalysatoren reagieren relativ empfindlich auf Überhitzungen mit Strukturveränderungen im Molekülaufbau. Darüber hinaus vergiften Schwermetalle bzw. deaktivieren Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium die katalytische Wirkung [Schultes 1996, Janbozorgi et al. 2010]. Beim Betrieb von Katalysatoren sind Wirksamkeitsverluste durch chemische Veränderungen, durch Wanderung von Verunreinigungen sowie mechanischen Belastungen nicht auszuschließen. Je rauer die Einsatzbedingungen des

Katalysators sind, desto schneller und stärker treten solche Verluste auf [Beebe et al. 1943, Schultes 1996, nach Janbozorgi et al. 2010].

Katalytische Oxidationsverfahren haben beim Einsatz in biomassebetriebenen Kleinf Feuerungsanlagen den Nachteil, dass eine katalytische Vergiftung bei der Verbrennung ungünstiger Brennstoffe aufgrund hoher Belastung durch unerwünschte Schadstoffe (wie z. B. Halogene, Schwefel, Polymere, Teer, Ruß und sonstige Aerosole) auftritt sowie dadurch die katalytische Wirkung dauerhaft verringert und mit der Zeit komplett aufgehoben wird [nach Mortimer et al. 2003]. Außerdem wird die katalytische Beschichtung (auch das Washcoat) aufgrund hoher thermischer und mechanischer (Erosion durch die Stäube bzw. hohe Abgasgeschwindigkeiten) Belastung sowie starker Temperaturwechsel (von ca. 250 °C bis ca. 900 C°) während des Betriebs bzw. nach mehreren Betriebsstunden beschädigt und somit die katalytische Wirkung aufgehoben. Wesentlich ist, dass ein Teil der katalytischen Beschichtung und Schwermetalle wie Platin, Rhodium und Palladium mit der Zeit abgetragen und über das Abgas in die Umgebung gelangen [nach Beebe et al. 1943, Janbozorgi et al. 2010] und gesundheitliche sowie Umweltprobleme verursachen können.

Da Einzelraumfeuerungsanlagen nur bei der Typprüfung und nicht wiederkehrend durch den Schornsteinfeger bezüglich der Emissionen überwacht werden müssen, wird die oben geschilderte Problematik mit der Beschädigung des Katalysators nicht festgestellt, folglich nicht sachgemäß und nicht rechtzeitig beseitigt. Bisher gibt es keine gesetzliche oder normative Regelung, wodurch der Ersatz oder die Regenerierung von Katalysatoren aufgrund von Alterung oder bei dem Auftreten von Funktionsschäden in der Praxis kontrolliert wird. Darüber hinaus ist eine betriebliche Manipulation solcher Abgasreinigungssysteme aufgrund des integrierten Abgasbypasses oder der leichten Zugänglichkeit und der Abbaumöglichkeit dieser Systeme gemäß der Prüfnormen (z. B. Raumheizer: DIN EN 13240, Kamineinsätze und Kachelöfen: DIN EN 13229) nicht zu vermeiden und nicht zu kontrollieren.

Aus umweltschutztechnischer und rechtlicher Sicht sollten katalytische Verfahren in Einzelraumfeuerungsanlagen ohne eine entsprechende wiederkehrende Kontrolle, wie z. B. durch den zuständigen Schornsteinfeger, nicht eingesetzt werden. Ziel dieser Maßnahme wäre, dass die Katalysatoren z. B. durch technische Weiterentwicklungen nicht nur auf dem Prüfstand sondern auch dauerhaft in der Praxis eine Funktionstüchtigkeit garantieren müssen. Diese nötige Kontrolle soll zur frühzeitigen Erkennung und Beseitigung der Funktionsdefizite des Katalysators in der Praxis führen, welche aufgrund der rauen und unkontrollierbaren Einsatzbedingung (hohe Staubbelastung, hohe Temperaturen > 800 °C und hohe Konzentration an Katalysatorgiftstoffen) in Biomassefeuerungsanlagen bereits nach mehreren Betriebsstunden auftreten können.

3.4.2.2 Thermische Oxidationsverfahren

Die bislang einzig bekannte Technik, die auf Basis rein thermischer Oxidation funktioniert, ist die Einbautentechnik. Diese Technik wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP erfunden und im Rahmen dieses Projekts erforscht. Eine ausführlich verfahrenstechnische Betrachtung der Einbautentechnik ist im Abschnitt 4 geschildert.

3.4.3 Technische Methode zur Bewertung der integrierten Technologien zum Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen

Zur Bewertung von in Einzelraumfeuerungsanlagen integrierbaren Technologien müssen sowohl technische als auch normative Anforderungen berücksichtigt werden, sodass ein sicherer und effizienter Praxisbetrieb gewährleistet werden kann. Abbildung 7 zeigt die wichtigsten Kriterien, nach denen integrierte Technologien bewertet werden sollten. Diese Methode wurde erst vom Fachgebiet Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP auf Basis breitgefächelter Erfahrungen mit der Entwicklung und der Implementierung von integrierten Technologien unter Berücksichtigung von technischen und normativen Anforderungen festgelegt.

Kriterien zur technischen Bewertung von Technologien zur Integrierung in Einzelraumfeuerungsanlagen

- Minderung staub- und gasförmiger Emissionen
- Gegenseitige Beeinflussung zwischen Verbrennungsparametern
- Funktion und Leistungsverhalten im Dauerbetrieb
- Aerodynamisches Verhalten (Druckverlustentwicklung während des Betriebs)
- Beladungsverhalten und thermische Selbstregenerierung
- Technische Beständigkeit (thermische, mechanische und chemische Beständigkeit)

Abbildung 7: Kriterien zur technischen Bewertung von Technologien zur Integrierung in Einzelraumfeuerungsanlagen.

Die Bewertungsmethode gemäß den in Abbildung 7 erwähnten Kriterien bezieht sich nur auf integrierte Technologien mit Strukturen, die durch die Bereitstellung günstiger Oxidationsbedingungen eine Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens gewährleisten sollen. Im Folgenden werden die Bewertungskriterien ausführlich erläutert.

3.4.3.1 Minderung der staub- und gasförmigen Emissionen

Die Minderung der staub- und gasförmigen Emissionen wird anhand des Reduktions- und Abscheidegrads beschrieben:

Reduktionsgrad/Minderungsgrad

Dieser Parameter beschreibt die Reduzierung der gas- und staubförmigen

Schadstoffemissionen durch die thermische Behandlung bzw. Oxidation. Integrierte Technologien sorgen in der Regel dafür, dass günstige Oxidationsbedingungen (Temperatur, Sauerstoff und Verweilzeit) gewährleistet werden können. Bei der Reduktion werden die Schadstoffe thermisch zersetzt und im optimalen Fall aufoxidiert. Beispielsweise wird Kohlenstoffmonoxid zu Kohlendioxid ($\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$) reagieren, wobei Kohlenwasserstoffe zu Kohlenstoffmonoxid als Zwischenprodukt und anschließend zu Wasser und Kohlenstoffdioxid ($\text{C}_n\text{H}_m + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) als Endprodukte thermisch umgewandelt werden. Organische staubförmige Emissionen werden in Anwesenheit von Temperatur und Sauerstoff thermisch zersetzt. Die entstehenden Zersetzungsprodukte (CO , CH_4 , H_2) reagieren mit Sauerstoff und bilden die typischen Verbrennungsprodukte (CO_2 und H_2O).

Abscheidegrad

Der Abscheidegrad beschreibt die Minderung der staubförmigen Schadstoffemissionen (organisch oder anorganische Partikel $> 1 \mu\text{m}$), die sich mechanisch abscheiden lassen. Hier wirken unterschiedliche Trenn- bzw. Abscheidemechanismen wie Sedimentation durch Schwerkraft, Fliehkraftabscheidung, Trägheitseffekt durch die Trägheitskraft, Sperreffekt, Diffusions- und Adsorptionseffekt.

Die Messung des Abscheidegrads erfolgt gravimetrisch gemäß VDI 2066-1. Hier werden alle Partikel erfasst, die sich auf den verwendeten Planfilter des Staubmessgeräts abscheiden lassen. Feine Partikel (ca. $< 1 \mu\text{m}$), die den Planfilter passieren, können nur durch Staubzählverfahren als Partikel pro Kubikzentimeter erfasst werden.

3.4.3.2 Funktion und Leistungsverhalten im Dauerbetrieb

Nach den heutigen gesetzlichen Vorgaben müssen in Deutschland die Einzelraumfeuerungsanlagen nur einmalig bei der Typprüfung auf dem Prüfstand hinsichtlich des Staubs und des Kohlenstoffmonoxids gemäß der 1. BImSchV kontrolliert werden. In manchen Gebieten bzw. Ländern sollen Einzelraumfeuerungsanlagen definierte Grenzwerte für Gesamtkohlenwasserstoffe einhalten (siehe Abschnitt 3.1). Die Untersuchung des Alterungsverhaltens oder der Messreproduzierbarkeit im Dauer- bzw. Praxisbetrieb ist in den jeweiligen Prüfnormen nicht vorgesehen. Nach einer bestandenen Typprüfung dürfen Einzelraumfeuerungsanlagen konstruktiv nicht mehr verändert werden. Jede Änderung erfordert eine Wiederholung der Typprüfung.

Da Einzelraumfeuerungsanlagen bisher keiner wiederkehrenden Überwachung hinsichtlich der Emissionen sowie des Wirkungsgrades durch den Schornsteinfeger unterliegen, werden technische Mängel, die die Qualität der Verbrennung beeinflussen, im Praxisbetrieb nur bedingt erkannt bzw. beseitigt. Aus diesem Grund sollen integrierte Technologien zur Verbesserung der Verbrennungsqualität hinsichtlich der Emissionsminderung und Effizienzerhöhung eine dauerhafte und sichere Funktion gewährleisten. Eine

funktionelle Alterung sollte im Praxisbetrieb durch entsprechende interne oder externe Überwachung rechtzeitig erkennbar sein oder im optimalen Fall nicht auftreten. Typisches Beispiel sind Katalysatoren, die nur kurzzeitig eine zuverlässige Funktion aufweisen. Bereits nach kurzer thermischen Belastung (je nach Washcoat bzw. Art der Beschichtung, $T > 700\text{ °C}$) oder Feinstaubbelastung wird die katalytische Funktion teilweise oder komplett aufgehoben (siehe Abschnitt 3.4.2.1).

3.4.3.3 Gegenseitige funktionelle Beeinflussung von Verbrennungsparametern

Bei den integrierten Technologien soll darauf geachtet werden, dass die Verbesserung eines Parameters durch die Technik keinen negativen Einfluss auf die anderen Verbrennungsparameter haben sollte. Beispielsweise sollte die Reduzierung der Emissionen nicht zur Verschlechterung der Verbrennungseffizienz oder zu einem unsicheren Betrieb in der Praxis führen. Ein unsicherer Betrieb kann beispielsweise durch eine unkontrollierte Erhöhung des Strömungswiderstands während des Betriebs hervorgerufen werden. Ein hoher Strömungswiderstand im Praxisbetrieb kann sowohl zur Verschlechterung des Emissions- und Verbrennungsverhaltens, als auch zum Austreten von Abgasen in den Aufstellraum und somit zu einer entsprechenden Gefährdung der Nutzer führen.

3.4.3.4 Aerodynamisches Verhalten (Druckverlust)

Das aerodynamische Verhalten beschreibt den Druckverlust und die Druckverlustentwicklung durch die integrierte Technik in allen Betriebsphasen der Einzelraumfeuerungsanlage bzw. im Neuzustand, während des Betriebs und nach der Reinigung der Struktur. Der Druckverlust stellt eine wichtige Größe für die Auslegung der integrierten Technologien dar. Bei der Auslegung soll der Druckverlust möglichst unter einer Grenze von 3 Pascal bleiben und sich während des Betriebs konstant verhalten (siehe Abschnitt 4.6.2). Integrierte Technologien mit Strukturen, die zur schnellen Verblockung von Abgaswegen aufgrund von Staubablagerungen führen, sollten in Einzelraumfeuerungsanlagen aus technischen und sicherheitsrelevanten Gründen nicht eingebaut werden. Ein Beispiel über die Ermittlung des aerodynamischen Verhaltens ist im Abschnitt 4.6.5 erläutert.

3.4.3.5 Beladungsverhalten und thermische Selbstregenerierung

Das Beladungsverhalten und die thermische Selbstregenerierung sind wichtige Größen zur Bewertung der integrierten Technologien hinsichtlich der Stabilität und der Sicherheit des Betriebs im Wohnbereich. Es ist wichtig zu ermitteln, wie schnell die Struktur der integrierten Technologie mit dem Staub, beim Auftreten ungünstiger Betriebsphasen, beladen wird und sich eigenständig und insbesondere ohne äußeren Eingriff von den abgeschiedenen Stäuben beim Erreichen günstiger Oxidationstemperaturen selbst reinigen kann. Ungünstige Betriebsphasen sind in diesem Zusammenhang Phasen, in denen höhere Staubbelastungen auftreten. Diese Phasen treten beim Betrieb von biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen aus folgenden Gründen sehr häufig auf:

- Kaltstart der Einzelraumfeuerungsanlagen (Anfahrbetriebsphase). Dieser Betriebszustand kann bei Feuerungsanlagen nicht vermieden werden. Eine Vorwärmung des Feuerraums oder der Brennkammer auf günstige Betriebstemperaturen ist bei solchen Verbrennungstechnologien nicht vorhanden.
- Einsatz ungünstiger Brennstoffe wie z. B. nasses oder sehr trockenes Holz.
- Gestörte Verbrennungsluftzufuhr aufgrund eines zu niedrigen Unterdrucks im Abgasabfuhrsystem oder eine falsche Einstellung der Verbrennungsluftzufuhr.
- Falsche Beschickung der Feuerungsanlage wie z. B. Einsatz größerer Brennstoffmasse oder sehr fein gehacktes Holz.

Die Struktur der integrierten Technologien spielt eine entscheidende Rolle sowohl beim Beladungsverhalten als auch bei der thermischen Selbstreinigung. Das Beladungsverhalten hängt sehr stark von den Trennmechanismen ab. Die Selbstreinigung wird durch die Strömungsform und -art sowie durch die Wärmeverteilung innerhalb der Struktur beeinflusst. Außerdem spielt das Material der Struktur eine ausschlaggebende Rolle. Hier gilt, je gleichmäßiger die Struktur mit dem heißen Abgas beströmt wird und je höher die Wärmeleitfähigkeit des Strukturmaterials ist, umso effektiver kann die thermische Regenerierung bzw. Selbstreinigung während des Betriebs erfolgen. Es ist zu erwähnen, dass sich die Selbstreinigung nur auf organische Stäube bezieht. Anorganische Stäube können thermisch nicht zersetzt werden. Sie bleiben in der Struktur, solange diese nicht durch einen äußeren Eingriff mechanisch oder pneumatisch gereinigt wird. Die großen Abgaswege in den Einbauten bzw. Füllkörpern sollen Verstopfungen durch Staubablagerungen vermeiden. Andere Strukturen wie z. B. Schaumkeramik oder Drahtgestrick haben den Nachteil, dass sie die Abscheidung der Stäube durch die Filtration gewährleisten, wodurch eine unkontrollierte Erhöhung des Strömungswiderstands während des Betriebs nicht auszuschließen ist.

3.4.3.6 Thermische, chemische und mechanische Beständigkeit

Die verwendeten Strukturen der integrierten Technologien sollten hohe chemische, thermische und mechanische Beständigkeit aufweisen. Optimaler Weise sollte das Material der Struktur über eine ähnliche Lebensdauer wie das Material der Feuerungsanlage verfügen.

Eine der wichtigsten Anforderungen an das Material der Struktur ist die hohe thermische Beständigkeit. Diese beschreibt die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber Temperatureinflüssen sowie Temperaturwechsel während des Betriebs. In Einzelraumfeuerungsanlagen schwanken die Temperaturen sehr stark. Im Einsatzbereich der integrierten Technologien sind unter Nennlast Abgastemperaturen zwischen 300 °C und 850 °C zu messen. Im Überlastbetrieb werden Abgastemperaturen von bis zu 1.000 °C erreicht.

Abgas aus der Verbrennung von Biomasse beinhaltet aggressive Gaskomponenten wie z. B. NO_x , SO_2 , HCl , die sowohl eine chemische Korrosion als auch Hochtemperaturkorrosion bei metallischen Strukturen verursachen können. Die chemische Korrosion wird durch aggressive Säuren wie z. B. Schwefelsäure, Salpetersäure verursacht, welche bei der Kondensation aufgrund von Taupunkttemperaturunterschreitungen entstehen. Hochtemperaturkorrosion kann bei allen Prozessen auftreten, die bei Temperaturen deutlich oberhalb von 100 °C stattfinden.

Neben der thermischen und chemischen Belastung kann das Material der Struktur beim Aufbau, Transport sowie bei der Reinigung mechanisch beansprucht werden. Außerdem kann bei der Strömung des heißen mit Staub beladenen Abgases ein hoher Verschleiß bzw. Abrieb des Materials auftreten. Dies verursacht starke Erosion, die mit der Zeit zu Materialermüdung bzw. zur Zerstörung der Struktur führt.

4 Verfahrenstechnische Grundlage der Einbautentechnik

4.1 Einbauten und technischer Aufbau des Einbautenmoduls

Einbauten oder Füllkörper sind Bauteile aus Keramik, Metall oder Kunststoff, die normalerweise in der Verfahrenstechnik zur Verbesserung von Strömungsverhältnissen, zur Phasentrennung und zur Erzeugung großer Stoffaustauschflächen eingesetzt werden. Klassische Einsatzbereiche der Einbautentechnik sind z. B. der Einsatz in der biologischen Abwasseraufbereitung oder in Trennsäulen in der Chemieindustrie. Abbildung 8 zeigt Beispiele für keramische und metallische Einbauten bzw. Füllkörper (Pall-Ringe, 35 mm, 50 mm und 80 mm).



Abbildung 8: Keramische und metallische Einbauten (Füllkörper) der Firma Raschig GmbH.

Der Einsatz der Einbauten in zentralen und dezentralen Kleinf Feuerungsanlagen zur Verbesserung von Verbrennungs- und Emissionsverhalten ist neu und wurde im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP erfunden. Damit die Einbauten in Verbrennungsprozessen bzw. in Kleinf Feuerungsanlagen verwendet werden können, müssen sie folgende Anforderungen erfüllen.

- Hohe Wärmespeicherkapazität,
- Gewährleistung hoher Turbulenz,
- raue Oberfläche mit adhäsiven Eigenschaften,
- niedriger Strömungswiderstand,
- hohe mechanische, thermische und chemische Beständigkeit.

Einbauten werden in der Regel in verfahrenstechnischen Großanwendungen nur in Form von Schüttungen eingesetzt, wodurch nur komplexe bzw. nicht-deterministische Strukturen gebildet werden können. Deterministisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Strömungswege über den ganzen Querschnitt sowie über die gesamte Höhe des Aufbaus definiert werden können. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die Einbauten hingegen deterministisch in Form eines Moduls, dem sogenannten Einbautenmodul, aufgebaut und in die Einzelraumfeuerungsanlagen integriert. Abbildung 9 zeigt einen beispielhaften technischen Aufbau eines Einbautenmoduls aus keramischen Pall-Ringen (50 mm). Die Einbauten sind hier deterministisch angeordnet. Daraus ergibt sich ein sehr niedriger Strömungswiderstand und somit ein niedriger Druckverlust.

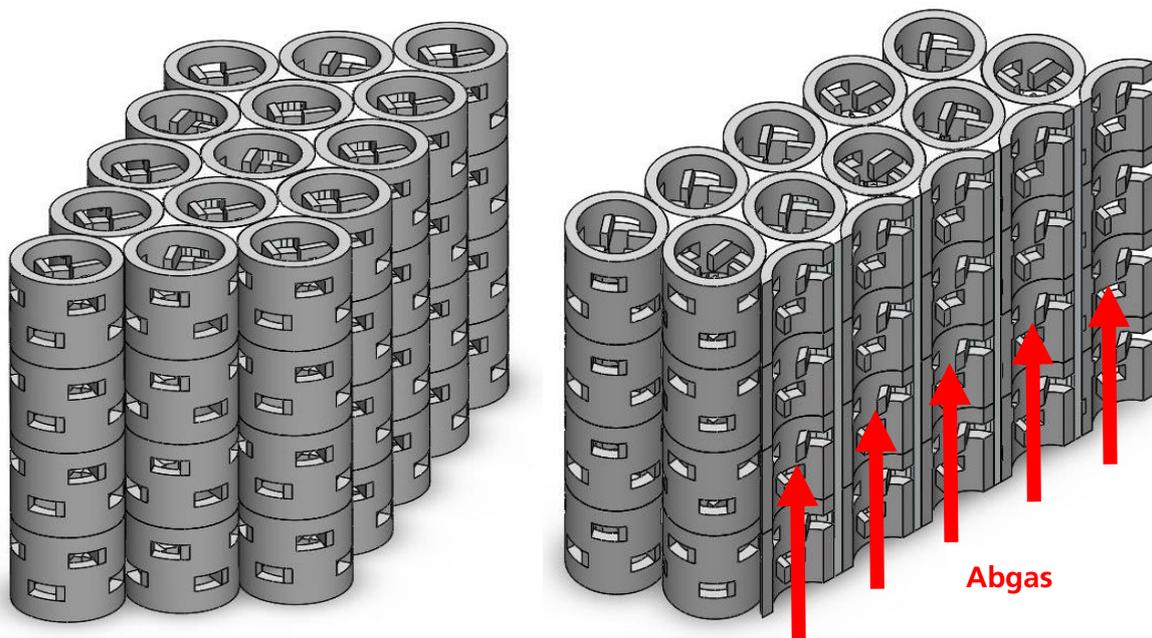


Abbildung 9: Technischer Aufbau des Einbautenmoduls (links), Vertikalschnitt im Einbautenmodul (rechts).

Das Einbautenmodul, wie in der Abbildung 9 dargestellt, soll über der Flamme im Feuerraumbereich eingebaut und vom Abgas in vertikale Richtung durchströmt werden. Hier soll darauf geachtet werden, dass die Flamme durch das Einbautenmodul nicht gequetscht und dadurch gelöscht wird.

Das Einbautenmodul soll nach außen so isoliert werden, dass ein adiabatisches System entsteht. Die Einbauten im Modul sollen möglichst dicht aneinander angeordnet werden, wodurch ein Wärmeaustausch innerhalb des Moduls, zwecks gleichmäßiger Wärmeverteilung während des Betriebs, erreicht werden kann.

4.2 Funktionsprinzip der Einbautentechnik

Das Wirkungsprinzip der Einbautentechnik beim Einsatz in Kleinf Feuerungsanlagen beruht auf der Bereitstellung günstiger Oxidationsbedingungen während der Verbrennung innerhalb eines definierten Einbautenmoduls (siehe Abschnitt 4.1). Dieses Modul speichert während der Verbrennung ausreichend Energie in Form von Wärme und stellt sie automatisch für die thermische Oxidation zur Verfügung, wenn die Temperaturen während der Verbrennung unter bestimmten Grenzen (Abgastemperatur < Modultemperatur) absinken. Durch seine spezielle Architektur gewährleistet das Einbautenmodul eine intensive Durchmischung der brennbaren Abgasbestandteile mit der Verbrennungsluft sowie eine Verlängerung der aktiven Verweilzeit durch eine Mehrfachumlenkung bzw. Verwirbelung der Abgase. Die gespeicherte Energie (Wärme) soll die Oxidation nicht verbrannter Bestandteile im Abgas in den ungünstigen Betriebsphasen wie z. B. beim Auflegen von Holz ermöglichen sowie zu einem stabilen Verbrennungsvorgang unabhängig von der Dynamik des Verbrennungsprozesses führen.

Unter brennbaren gasförmigen Bestandteilen bei der Verbrennung von Biomasse entstehen hauptsächlich Kohlenstoffmonoxid, Methan, Formaldehyd und Wasserstoff. Diese Abgase können direkt mit Sauerstoff bei Temperaturen > 500 °C zu Kohlendioxid und Wasser reagieren. Häufig wird in diesem Zusammenhang von einer Online-Oxidation gesprochen, das heißt die Oxidation erfolgt bei der Durchströmung der Abgase in das Einbautenmodul. Bei staubförmigen brennbaren Bestandteilen (organischer Feinstaub und organische Aerosole) ist zwischen zwei Behandlungsphasen zu unterscheiden, welche entweder bei der Durchströmung der Partikel in das Einbautenmodul oder nach dem Anhaften der Partikel an der Oberfläche der Einbauten im Reaktor stattfinden. In den beiden Phasen werden die flüssigen bzw. festen Partikel durch Verdampfung oder thermische Zersetzung zu brennbaren Gasen (wie z. B. CO oder C_nH_m) umgewandelt. Diese Gase werden in Gegenwart von Sauerstoff und ausreichend hoher Temperatur zu Kohlenstoffdioxid und Wasser oxidiert. Bei brennbaren staubförmigen Bestandteilen ist zwischen Ruß und organischen Kohlenstoffverbindungen zu unterscheiden. Organische Kohlenstoffverbindungen verdampfen oder zersetzen sich bei erhöhten Temperaturen (bis ca. 600 °C). Ruß hingegen verdampft bei diesen niedrigen Temperaturen nicht und verbrennt erst bei

Temperaturen oberhalb von 600 °C in Gegenwart von Sauerstoff. Dieses Kenntnis ist besonders wichtig für die Auslegung der Einbautentechnik hinsichtlich der Selbstreinigung bzw. des Einsatzes in Einzelraumfeuerungsanlagen.

Anorganische Feinstäube werden aufgrund elektrischer, thermischer und turbulenter Effekte agglomeriert. Anorganische Feinstäube verändern ihren Ladungszustand bei hohen Temperaturen aufgrund von thermischen Emissionsvorgängen [Reuter-Hack 2011]. Es ist stark zu vermuten, dass die Feinstäube je nach ihrer Beschaffenheit entweder positiv oder negativ geladen werden. Durch die entstehenden elektrischen Kräfte bilden die anorganischen Partikel stabile Agglomerate und werden an der Oberfläche der Einbautentechnik abgeschieden (Abbildung 10).



Abbildung 10: Bildung von Agglomeraten im Einbautenmodul beim Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen.

Aus dem oben geschilderten Funktionsprinzip lässt sich erkennen, dass die Einbautentechnik sowohl als Oxidationsreaktor als auch als Feinstaubfilter funktioniert. Daher wird sie auch als Filter-Oxidations-Reaktor bezeichnet.

4.3 Vorteil und Besonderheit der Einbautentechnik

Die Einbautentechnik hat im Vergleich zu den derzeit eingesetzten Technologien zur Schadstoffminderung in Kleinfeuerungsanlagen eine Reihe von technischen und konzeptionellen Vorteilen, wodurch die Umsetzbarkeit in der Praxis gewährleistet werden kann. Im Folgenden sind diese Vorteile erläutert:

- Die Funktion der Einbautentechnik ist auf Dauer zu gewährleisten. Die Oxidation findet in den Einbautenmodulen rein thermisch ohne Alterungsprobleme statt, die bei Katalysatoren innerhalb von kurzer Zeit auftreten (siehe Abschnitt 3.4.2.1).
- Die Filter-Oxidationswirkung der Einbautentechnik sorgt über den gesamten Abbrand für einen stabilen Betrieb der Kleinf Feuerungsanlagen mit geringen Emissionen und hohen Wirkungsgraden. Das Funktionsprinzip der Einbautentechnik ist in Abschnitt 4.2 erläutert.
- Durch den Einsatz der Einbautentechnik wird ein Brennstoffersparnis aufgrund der Verbesserung der Verbrennungseffizienz von mindestens 12 % erzielt. Durch die Strömungsstabilisierung und Wärmespeicherung lassen sich die Wärmeverluste im Abgas sowie die Verluste durch nicht verbrannte Bestandteile reduzieren, wodurch eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrads zu erreichen ist. Beim Auftreten von hohen Abgastemperaturen wird auf natürliche Art Wärme vom Abgas an das Einbautenmodul übertragen bzw. im Modul gespeichert. Anschließend wird die Wärme gleichmäßig und effizient an den Aufstellraum abgegeben. Durch die Speicherung der Wärme im Einbautenmodul werden Temperaturspitzen im Abgas verringert (siehe Abschnitt 6.1.2.2).
- Der durch die Einbautentechnik verursachte Druckverlust liegt während des Betriebs unter 2 Pascal. Die großen Öffnungsweiten (Durchmesser des Abgaswegs bis 7 cm möglich) der Einbautentechnik sorgen für einen geringen Strömungswiderstand.
- Es besteht aufgrund großer Abgaswege keine Verstopfungsgefahr beim Einsatz ungünstiger Brennstoffe. Durch die großen Abgaswege sowie die hohen erreichbaren Temperaturen im Einbautenmodul kommt es auch beim Einsatz ungünstiger Brennstoffe, wie z. B. feuchtem Holz, nicht zu einer Verblockung der Abgaswege.
- Die Einbautentechnik ist sehr robust gegenüber der Art der Beschickung und der Änderung von verbrennungstechnischen Eigenschaften des eingesetzten Brennstoffs. Durch die Generierung einer Durchmischung und die intensive Wärmeabgabe der Einbauten in den Abgasstrom können Schadstoffe auch bei einer Veränderung betrieblicher Parameter der Kleinf Feuerungsanlagen für einen stabilen Verbrennungsbetrieb sorgen.
- Die Einbautentechnik ist im Praxisbetrieb nicht manipulierbar. Da eine Verblockung während des gesamten Betriebs auszuschließen ist, ist bei der Verwendung der Einbautentechnik kein Bypass notwendig. Außerdem ist der Ausbau der Einbautentechnik zu Reinigungszwecken, wie bei anderen integrierten Technologien, nicht notwendig und aufgrund des verstopfungsfreien Betriebs nicht vorgesehen.
- Zum Betrieb der Einbautentechnik wird keine zusätzliche Energie benötigt. Die Energie wird während des Betriebs gespeichert und in den ungünstigen Betriebsphasen (Start- und Ausbrandphasen) für die Oxidation auf eine natürliche Weise bereitgestellt.

- Die Einbautentechnik ist sehr preiswert und nachrüstbar. Die Materialkosten liegen deutlich unter 15 €/Modul. Außerdem werden zur Anfertigung der Einbautenmodule keine speziellen Anfertigungstechnologien oder Sonderkompetenzen benötigt.
- Die Materialien der Einbauten (Keramik, Edelstahl oder Metallguss) sind mechanisch, thermisch und chemisch beständig. Diese Eigenschaft garantiert eine hohe Langlebigkeit der Technik, sodass sie im Vergleich zu üblichen Filtersystemen wie z. B. Schaumkeramik oder Drahtgestrick nicht periodisch ausgetauscht werden muss.
- Die Einbautentechnik ist wartungsarm und selbstreinigend. Die hohe Materialbeständigkeit und die großen Abgaswege in den Einbautenmodulen sorgen dafür, dass sich die Technik eigenständig reinigt und regenerieren kann bzw. nicht gewartet werden muss.

Aus den oben aufgelisteten Vorteilen lässt sich die Einbautentechnik sowohl technisch einfach als auch ökonomisch und ökologisch sinnvoll einsetzen. Diese Technik ist nicht nur bei der Herstellung sowie beim Betrieb sondern auch bei der Entsorgung umweltfreundlich und kostengünstig. Darüber hinaus zeichnet sich die Einbautentechnik dadurch aus, dass sie nicht nur für eine kurze Zeit auf dem Prüfstand unter Sonderbetriebsbedingungen sondern für einen sicheren Betrieb unter Praxiseinsatzbedingungen funktioniert.

4.4 Verfahrenstechnische Kenngrößen zur Auslegung der Einbautentechnik

Zur optimalen Auslegung und Funktion der Einbautentechnik als thermisches Nachverbrenungsverfahren sollen folgende betriebliche Kenngrößen besonders berücksichtigt werden:

- Art des Schadstoffs (staub- oder gasförmige bzw. leicht- oder schweroxidierbare Schadstoffe),
- Die Art des Brennstoffs ist eine entscheidende Einflussgröße für die Verbrennungsqualität,
- Sauerstoffgehalt und Sauerstoffverteilung in der aktiven Reaktionszone (lokaler Sauerstoff) unabhängig von den Druck- und Strömungsverhältnissen in der Feuerungsanlage während des Betriebs,
- Höhe des Temperaturniveaus im Feuerraumbereich sowie im Einbautenmodul,
- Temperaturverteilung bzw. Temperaturgleichförmigkeit im Einbautenmodul,
- Intensität der Vermischung der Reaktionspartner (Sauerstoff mit den staub- und gasförmigen brennbaren Bestandteilen),
- Stabilisierung der Strömung in der aktiven Reaktionszone bei unterschiedlichen Druck- und Strömungsverhältnissen in der Feuerungsanlage bzw. in der Abgasanlage ohne negativen Einfluss auf die Verbrennungsluftzufuhr oder Störung der Abgasförderung aus der Feuerungsanlage,

- Verweilzeit in der aktiven Reaktionszone bzw. im Einbautenmodul,
- Intensität der Wärmestrahlung im Einbautenmodul.

Die Oxidationsleistung der staub- und gasförmigen Bestandteile lässt sich durch folgende Maßnahmen erhöhen:

- lange Verweilzeiten,
- hohe Reaktionstemperaturen,
- gleichmäßige Temperaturverteilung,
- erhöhte Turbulenzen und/oder
- mäßiger Sauerstoffüberschuss bzw. ausreichend hohe lokale Sauerstoffkonzentrationen.

Zwischen den oben erwähnten Maßnahmen bestehen große Wechselwirkungen untereinander, welche bei der Beurteilung ihrer Wirksamkeit mit einbezogen werden müssen. Die Absenkung der Oxidationstemperaturen fordert die Erhöhung der nötigen Verweilzeit, um die Oxidation brennbarer Bestandteile vervollständigen zu können. Bei erhöhten Temperaturen verkürzt sich die Verweilzeit. Die Oxidationsreaktionen benötigen eine minimale Laufzeit unabhängig von der Höhe des Temperaturniveaus in der Oxidationskammer. In der Regel haben die hohen Sauerstoffkonzentrationen in der aktiven Reaktionszone keinen Einfluss auf die Verkürzung der nötigen Reaktionszeit. Sie erhöhen lediglich die Wahrscheinlichkeit, dass die brennbaren Bestandteile mit den Sauerstoffmolekülen in Kontakt kommen und reagieren können. Hier muss darauf geachtet werden, dass es durch den hohen Sauerstoffüberschuss im Abgas nicht zur Kühlung der Flamme bzw. des Reaktors kommt und die Oxidation dadurch negativ beeinträchtigt wird.

Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten und im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP durchgeführten Projekts [siehe Aleya et al. 2015] wurden zwei Strukturgruppen bzw. deterministische und nicht-deterministische Strukturen für den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen unter praktischen und reproduzierbaren Einsatzbedingungen untersucht. Diagramm 3 und Diagramm 4 zeigen die Oxidationsleistung der untersuchten Strukturen. Es ist in den beiden Diagrammen zu sehen, dass die Oxidationsleistung bei allen Strukturen mit steigenden Temperaturen ansteigt und stark von der Verweilzeit im Einbautenmodul abhängt. Bei metallischen und keramischen Einbautenmodulen sind die Reduktionsgrade von Kohlenstoffmonoxid und Propan deutlich höher als bei Schaumkeramik und Drahtgestrick. Diese höhere Oxidationsleistung bzw. der höhere Reduktionsgrad für Kohlenstoffmonoxid ist auf die längere Verweilzeit zurückzuführen, die sich in diesen Modulen bezüglich des Einsatzes in Einzelraumfeuerungsanlagen einstellen lässt.

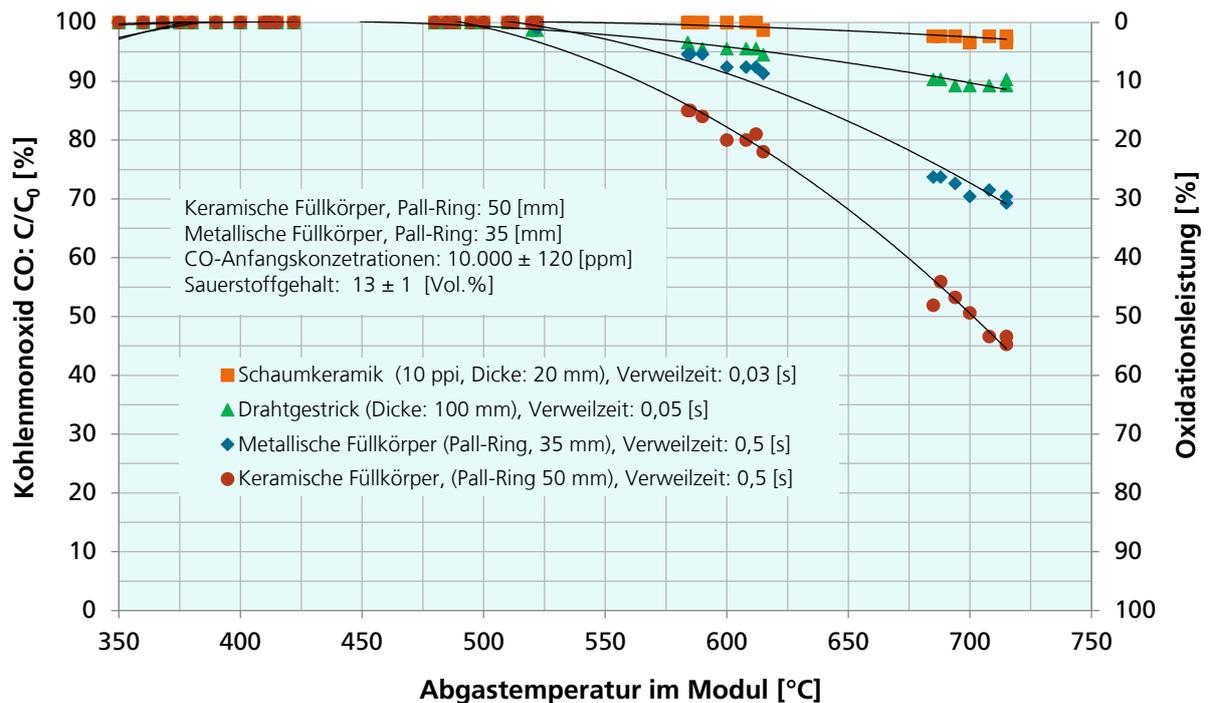


Diagramm 3: Reduktionsgrade von Kohlenstoffmonoxid [Aleysa et al. 2015].

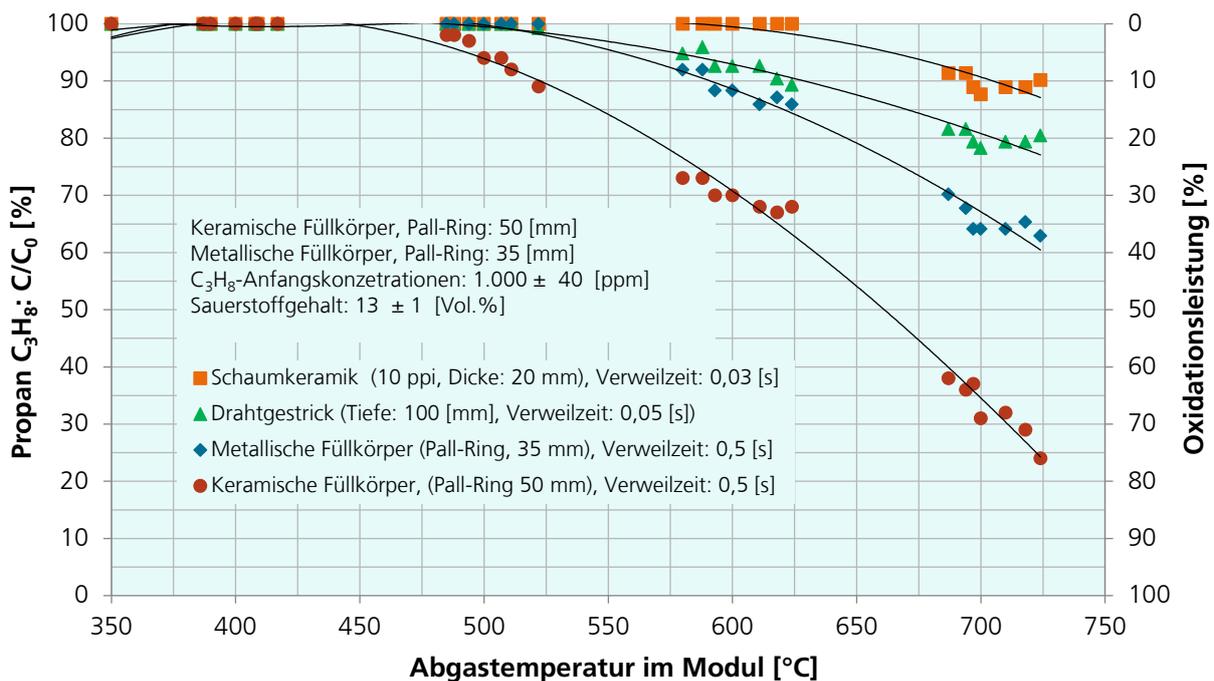


Diagramm 4: Reduktionsgrad von Propan [Aleysa et al. 2015].

In Diagramm 3 und Diagramm 4 ist ersichtlich, dass die Oxidationsleistung, trotz gleicher Aufenthaltszeit des Abgases, in keramischen Einbauten deutlichen höher ist als bei metallischen Einbauten. Das kann auf unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden, die für die zielgerechte Entwicklung von Strukturen sehr interessant sein können. Hier kann sowohl die Architektur der Struktur als auch das Material der Struktur eine Rolle

spielen. Die Architektur der Struktur hat einen großen Einfluss auf die Art sowie die Intensität der Turbulenz und somit auf die lokale Sauerstoffverteilung innerhalb der Struktur. Das Material der Struktur spielt durch seine spezifische Wärmespeicherkapazität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmestrahlungsintensität eine wesentliche Rolle, welche die Bereitstellung der gespeicherten Wärme für die Oxidation beeinflussen kann.

Die im DBU-Projekt erworbenen Erfahrungen und Kenntnisse wurden für die Entwicklung und Bewertung der Einbautentechnik für den realen Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen in diesem Forschungsprojekt verwendet.

4.5 Auswahl von Einbauten zum Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen

Die Einbautentechnik soll sowohl als Filter als auch als Reaktor funktionieren. Um das zu realisieren, müssen die Einbauten sowohl bestimmte Anforderungen erfüllen (siehe Abschnitt 4.1) als auch über eine bestimmte Struktur verfügen. Die auf dem Markt verfügbaren Strukturen lassen sich in deterministische und nicht-deterministische Strukturen unterteilen. Deterministische Strukturen sind konstruktiv so aufgebaut, dass sie definierte Abgasströmungswege über den gesamten Querschnitt sowie über die gesamte Höhe des Aufbaus (des Einbautenmoduls) aufweisen. Diese Abgaswege weisen keine strömungsruhige Zonen oder wechselnde Strömungsrichtungen auf und werden nicht innerhalb der Struktur komplett oder teilweise beendet. Nicht-deterministische Strukturen haben in der Regel sehr komplexe Abgaswege bezüglich der Form sowie des Verlaufs innerhalb der Struktur.

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten des Fachgebiets Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP wurden deterministische und nicht-deterministische Strukturen untersucht [Aleysa et al 2015]. Die Bewertung der untersuchten Strukturen wurde hinsichtlich des Einsatzes in handbeschickten biomassebetriebenen Feuerungsanlagen gemäß folgenden Kriterien durchgeführt und in Tabelle 7 dargestellt.

- Entwicklung des Druckverlustes während des Betriebs
- Beladungsverhalten
- Verstopfungsgefahr während des Betriebs
- Reinigungsbedarf und Reinigungshäufigkeit
- Sicherheit und Zuverlässigkeit während des Betriebs
- Reduktion brennbarer gasförmiger Schadstoffemissionen am Beispiel Kohlenstoffmonoxid (CO) und Propan (C₃H₈)
- Reduktion staubförmiger Emissionen am Beispiel Ruß als typisches Produkt bei unvollständiger Verbrennung
- Potential zur Effizienzerhöhung im Praxisbetrieb
- Thermische und mechanische Stabilität im Dauerbetrieb
- Wirtschaftlichkeit

In der Tabelle 7 ist deutlich zu erkennen, dass sich die deterministischen Strukturen gut für den Einsatz in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen eignen. Ein Nachteil der nicht-deterministischen Strukturen liegt in der raschen Entwicklung von Druckverlusten während des Betriebs, wodurch zusätzlich zur Verstopfungsgefahr eine aufwändige und häufige Abreinigung des Systems erforderlich ist. Bei einer partiellen Verstopfung kann die Verbrennungsluftzufuhr gestört und somit die Verbrennung verschlechtert werden. Zusätzlich dazu kann das Abgas aus der Feuerungsanlage in den Aufstellraum vor allem bei der Nachbeschickung von Holz austreten. Da die Strukturen von Zeit zu Zeit durch die Nutzer abgereinigt werden müssen, sind sie zugänglich in die Feuerungsanlagen einzubauen. Diese manipulierbare Bauweise hat zur Folge, dass beim häufigen Auftreten von Verstopfungen oder Defekten die Systeme durch die Nutzer abgebaut und nicht mehr ersetzt werden. Da die Einzelraumfeuerungsanlagen keiner wiederkehrenden Überwachung unterliegen, bleibt eine konstruktive Änderung oftmals unbemerkt, sodass die Feuerungsanlagen ohne Filter weiter betrieben werden. Zusätzlich dazu lassen sich nicht-deterministische Strukturen nur schwierig bis unmöglich konstruktiv identisch und reproduzierbar anfertigen. Dies kann je nach Strukturarchitektur zu unterschiedlichen Strömungsverhältnissen sowie Emissions- und Verbrennungswerten führen.

Tabelle 7: Bewertung der Struktur bezüglich des Einsatzes in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen [Aleysa et al. 2015].

Kategorien	Nicht-deterministische Strukturen		Deterministische Strukturen	
	Schaumkeramik (Nichtoxidkeramik)	Drahtgestrick (Edelstahl)	Keramische Einbauten	Metallische Einbauten
Druckverlust während des Betriebs	--	--	++	++
Beladungsverhalten	--	--	++	++
Verstopfungsgefahr während des Betriebs	--	--	++	++
Reinigungsbedarf/Reinigungshäufigkeit	-	--	++	++
Effizienzerhöhung im Praxisbetrieb	0	0	++	+
Sicherheit und Zuverlässigkeit	--	--	++	++
Reduktion brennbarer Abgase	--	--	++	+
Reduktion staubförmiger Emissionen				
< günstige Oxidationstemperatur	+	+	0	0
> günstige Oxidationstemperatur	+	+	++	+
Mechanische Stabilität	-	+	++	++
Thermische Stabilität im Dauerbetrieb	+	+	++	++
Wirtschaftlichkeit	-	+	++	++

++ sehr gut - schlecht 0 neutral
+ gut -- sehr schlecht

Integrierte Technologien dürfen in der Regel in die Einzelraumfeuerungsanlagen aufgrund von Verstopfungsgefahr nicht dicht eingebaut werden. Es ist gemäß der Prüfnormen- und -regelungen eine zusammenhängende freiströmende Fläche von minimal 20 cm² um die Platten frei zu lassen oder ein Bypass in die Feuerungsanlage zu integrieren. Beim Auftreten von partieller oder kompletter Verstopfung wird die Struktur nicht vom Abgas durchströmt, sondern einfach umströmt. Das hat zur Folge, dass keine Filtration gewährleistet wird. Nicht-deterministische Strukturen agieren gut als Filter aber nicht als Reaktor. Das ist mit dem geringeren Reduktionsgrad der brennbaren gasförmigen Schadstoffemissionen zu begründen. Die relativ gute Filtrationsleistung tritt erst beim Aufbau eines Staubkuchens auf der Strukturoberfläche auf. Im Neuzustand, in dem die Poren offen sind, können die feinen Partikel die Struktur zum großen Teil passieren, bis ein Staubkuchen gebildet wird. Je feinporiger die Struktur ist, umso schneller bildet sich ein Filterkuchen, mit dem hohe Abscheidegrade erreicht werden [Aleysa et al. 2015].

Deterministische Strukturen haben den Vorteil, dass der Druckverlust beim Auftreten ungünstiger Betriebszustände nicht schnell ansteigt und folglich Zustände vermieden werden können, bei denen ein Austreten von Abgasen in den Aufstellraum der Feuerungsanlagen oder hohe Schadstoffbelastungen in die Umwelt abgegeben werden. Durch dieses Druckverlustentwicklungsverhalten sowie durch die nicht manipulierbare Bauweise, werden Filter-Reaktor-Systeme auf Basis der untersuchten deterministischen Strukturen sicher und zuverlässig betrieben. Im Allgemeinen können bei deterministischen Strukturen höhere Verweilzeiten (bis 1,5 Sekunden) beim Einsatz in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen (ohne Saugzuggebläse) realisiert werden, als bei nicht-deterministischen Strukturen, ohne dabei Probleme mit Druckverlustserhöhungen im Dauerbetrieb zu erhalten. Deterministische Strukturen agieren sowohl als Feinstaubfilter, als auch als Reaktoren. Durch die Bereitstellung günstiger Oxidationsbedingungen, ausreichend lange aktive Verweilzeit, hohe Temperaturen und eine intensive Durchmischung des Sauerstoffs mit den brennbaren Bestandteilen in der Struktur, werden sowohl organische Feinpartikel als auch brennbare Schadgase aufoxidiert und somit behandelt. Zusätzlich zu dem hohen Potential der Schadstoffminderung tragen deterministische Strukturen durch die besondere konstruktive Bauweise maßgeblich zur Effizienzerhöhung der Feuerungsanlagen bei [Aleysa et al. 2015].

In der Tabelle 7 ist ersichtlich, dass metallische und keramische Einbauten (Typ: Pall-Ringe) ein großes Potential für den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen haben. Im Rahmen dieses Projekts wurden Einbautenmodule aus handelsüblichen Pall-Ringen (metallische Pall-Ringe 35 mm und keramische Pall-Ringe 50 mm) aufgebaut und unter Praxisbedingungen für zwei unterschiedliche Betriebsweisen (gemäß DIN EN 13240 und DIN EN 15250) der Einzelraumfeuerungsanlagen erforscht.

4.6 Auslegung von Einbautentechnik

In diesem Abschnitt wird die Einbautentechnik verfahrenstechnisch hinsichtlich der Auslegung für den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen betrachtet. Dabei werden folgende Punkte ausführlich behandelt:

- Erforderliche Angaben zur Auslegung der Einbautentechnik
- Charakteristische Größe zur Auslegung der Einbautentechnik
- Berechnung und Dimensionierung des Einbautenmoduls
- Ermittlung des Druckverlusts

Am Ende dieses Kapitels wird eine beispielhafte Auslegung für die Einbautentechnik zum Einsatz in einem Kamineinsatz gemäß DIN EN 13229 durchgeführt.

4.6.1 Erforderliche Angaben zur Auslegungen der Einbautentechnik

Zur Auslegung der Einbautentechnik sind Angaben über das Abgas, über die Feuerungsanlage, über den Brennstoff sowie über die verwendeten Einbauten bzw. Füllkörper erforderlich. In der Tabelle 8 sind die wichtigsten Angaben dargestellt.

Tabelle 8: Erforderliche Angaben zur Auslegung der Einbautentechnik.

Angaben über das Abgas
<ul style="list-style-type: none">– Minimaler Unterdruck im Schornstein– Abgastemperatur– Abgaszusammensetzung– Maximale Beladung mit staub- und gasförmigen Schadstoffen– Minimaler, maximaler und mittlerer Abgasvolumenstrom– Abgasmassenstrom– Abgasdichte– Abgasviskosität– Wärmekapazität– Druck– Luftüberschusszahl
Angaben über die Feuerungsanlage
<ul style="list-style-type: none">– Verbrennungsprinzip (Unterbrand, Oberbrand)– Anlagentyp (Grundofen, Speicherfeuerstätte oder Kamineinsatz usw.)– Thermische Leistung– Konstruktion– Feuerraumauskleidung, Flächen der Glasscheiben– Verbrennungsluftzufuhr– Abgasabfuhr und Abgaswege– Fläche des Feuerraumbodens– Dimension und das Volumen der Nachoxidationskammer– Erforderlicher Unterdruck (Förderdruck) für einen sicheren Betrieb

Angaben über die Einbauten
<ul style="list-style-type: none"> – Material der Einbauten (Füllkörper) – Art und Architektur der Struktur – Dimension der Einbauten (Durchmesser und Länge bzw. Höhe) – Volumen der Einbauten – Mechanische, chemische und thermische Stabilität – Druckverlustbeiwert
Angaben über den Brennstoff
<ul style="list-style-type: none"> – Elementare Zusammensetzung – Heizwert – Energiedichte – Feuchtegehalt – Aschegehalt
Sonstige Angaben
<ul style="list-style-type: none"> – Anwendungsbereich und –gebiet – Angaben über die Besonderheit Verbrennungsprozess (Chargenbetrieb, kontinuierlicher Betrieb, automatisiert bzw. geregelter Betrieb usw.) – Technische und normative Anforderungen – Sicherheitsanforderungen

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Abgases müssen für jeden Anwendungsfall experimentell ermittelt werden. Außerdem muss der Verbrennungsprozess, in dem das Abgas produziert wird, beschrieben und charakterisiert werden. Der Konstrukteur muss sich mit der Arbeitsweise und dem Betrieb der Feuerungsanlage auseinandersetzen. Vorrangiges Ziel der Auslegung der Einbautentechnik ist die Bestimmung des nötigen Volumens und der günstigen Strömungsfläche des Einbautenmoduls. Die wesentliche Kenngröße ist hierbei die effektive thermische Volumenbelastung des Einbautenmoduls, die Verweilzeit und Strömungsflächenbelastung, da diese die Oxidationsleistung, den Druckverlust und die Druckverlustentwicklung während des Betriebs beeinflussen können.

4.6.2 Charakteristische Größe zur Auslegung der Einbautentechnik

Um eine möglichst hohe Abscheide- und Reduktionsleistung der Einbautentechnik als spezielles thermisches Nachverbrennungsverfahren zu erreichen, ist es wichtig, dass das Einbautenmodul als das Kernstück dieser Technik entsprechend berechnet und dimensioniert wird.

Bei der Dimensionierung sollen zwei spezifische Belastungen des Einbautenmoduls berücksichtigt werden:

- Strömungsflächenbelastung des Einbautenmoduls
- Thermische Flächen- und Volumenbelastung des Einbautenmoduls

Strömungsflächenbelastung

Die Strömungsflächenbelastung gibt an, mit wie vielen Betriebskubikmetern Abgas pro Quadratmeter Modulfläche und Zeiteinheit das Einbautenmodul zu beaufschlagen ist, damit ein sicherer und stabiler Betrieb der Einbautentechnik erzielt werden kann (Abbildung 11). Die aktive Strömungsfläche des Einbautenmoduls bestimmt den Druckverlust, die Wärmeverteilung sowie die Stabilisierung der Druck- und Strömungsverhältnisse innerhalb des Einbautenmoduls während des Betriebs. Der Druckverlust entwickelt sich umgekehrt proportional mit der aktiven Strömungsfläche, d. h. mit zunehmender Strömungsfläche sinkt der Druckverlust ab bzw. mit abnehmender Strömungsfläche steigt der Druckverlust an. Bei der Auslegung der Einbautentechnik ist die Annahme einer Strömungsflächenbelastung von 0,2 [m³/m².s] bis 0,8 [m³/m².s] zu empfehlen. Bei Einzelraumfeuerungsanlagen gilt: Je niedriger die Strömungsflächenbelastung ist, umso länger ist die Verweilzeit in der aktiven Reaktionszone und umso besser wird die Oxidation. Sehr geringe Strömungsflächenbelastungen (ca. < 0,1 [m³/m².s]) führen zur Überdimensionierung des Einbautenmoduls sowie des Querschnitts der Feuerungsanlage und folglich zu zunehmenden Wärmeverlusten, bevor das Abgas dem Einbautenmodul zugeführt wird. Die Überdimensionierung hat eine Verringerung der thermischen Volumenbelastung und eine ungünstige Wärmeverteilung innerhalb des Einbautenmoduls zur Folge (siehe thermische Volumen- und Flächenbelastung).

Strömungsflächenbelastung

Zur Auslegung der Einbautentechnik für den Einsatz in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen ist für die Strömungsflächenbelastung ein Wert zwischen 0,2 bis 0,8 [m³/m².s] anzunehmen. Bei der Annahme dieser Strömungsflächenbelastung ist im Neuzustand ein maximaler Druckverlust von 3 Pascal einzuhalten.

$$g_{Em} = \frac{\dot{V}_{Ag}}{A_{Em}} = \frac{\dot{V}_{Ag}}{a \times b} \quad [\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}] \quad \text{Gleichung 1}$$

Wobei:

\dot{V}_{Ag} : Abgasvolumenstrom [m³/s]

g_{Em} : Strömungsflächenbelastung [m³/m².s]

A_{Em} : Die aktive Strömungsfläche des Einbautenmoduls [m²]

Der günstige Wert für die Strömungsflächenbelastung in dem empfohlenen Bereich zwischen 0,2 [m³/m².s] und 0,8 [m³/m².s] wird durch den maximal erlaubten Druckverlust in der gesamten Feuerungsanlage bestimmt. Bei der Auslegung ist ein Druckverlust von kleiner als 3 Pascal in der gesamten Feuerungsanlage bei einer Abgastemperatur von 750 °C einzuhalten. Ein

Druckverlust von größer als 3 Pascal führt während der Nachbeschickung des Brennstoffs bei ungünstigen Druckverhältnissen in der Abgasanlage zum Austreten von Abgasen aus dem Feuerraum. Der Förderdruck in der Abgasanlage bzw. im Schornstein soll sowohl für die Überwindung des Strömungswiderstandes in der gesamten Feuerungsanlagen als auch zur Zufuhr der nötigen Verbrennungsluftmenge sorgen, sodass dem Verbrennungsprozess ausreichend Sauerstoff zur Verfügung gestellt sowie eine sichere Abfuhr des Abgases aus der Feuerungsanlage gewährleistet werden kann.

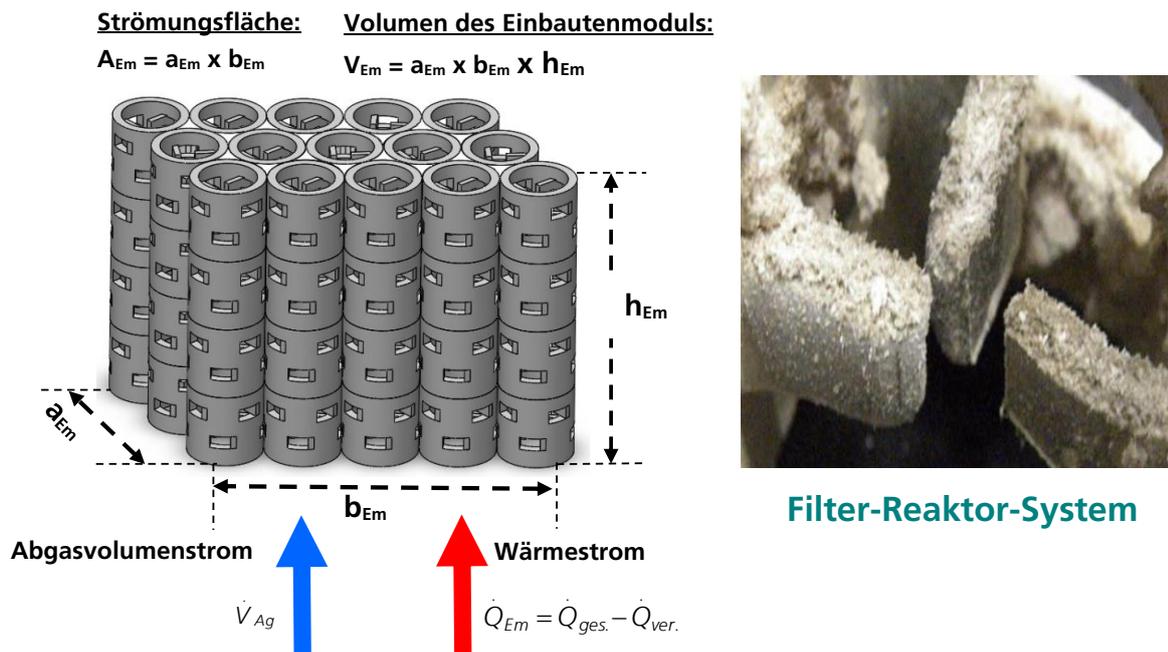


Abbildung 11: Abmessungsbezeichnung für ein Einbautenmodul.

Die maximal zu realisierende Strömungsfläche hängt meistens von der Geometrie sowie dem Design der Einzelraumfeuerungsanlagen ab, auf das von den Herstellern viel Wert gelegt wird. Eine Einzelraumfeuerungsanlage wird vielmehr als Kunstwerk im Wohnraum und nicht nur als Heizsystem betrachtet.

Die minimale freie Strömungsfläche ergibt sich aus den normativen Anforderungen. Gemäß den Prüfnormen soll eine minimale Strömungsfläche freigelassen werden. Das soll auch bei der Integrierung von Filtern sowie katalytischen und thermischen Oxidationsverfahren wie z. B. der Einbautentechnik berücksichtigt werden. Beispielsweise müssen gemäß der Norm DIN EN 13240 die Heizgaszüge über eine Mindestweite von 30 mm verfügen. Diese Mindestweite darf auf 15 mm reduziert werden, wenn in der Feuerungsanlage keine bituminösen Brennstoffe (wie Kohlen und Torf) verfeuert werden und Reinigungsöffnungen zur Reinigung der Heizgaszüge vorhanden sind.

Druckverlust

Der Druckverlust in der gesamten Einzelraumfeuerungsanlage bei einer Abgastemperatur von 750 °C sollte kleiner als 3 Pascal sein. Der Einsatz von Strukturen (Einbauten), die zu unkontrollierten Druckverlusten beim Auftreten ungünstiger Betriebszustände führen, ist aus technischen und Sicherheitsgründen nicht zu empfehlen. Bei einer maximalen Abgastemperatur von 750 °C, welche in Einzelraumfeuerungsanlagen zu erwarten ist, sollte der höchste Abgasvolumenstrom und somit der höchste Druckverlust produziert werden.

Thermische Volumen- und Flächenbelastung des Einbautenmoduls

Die thermische Volumen- bzw. Flächenbelastung beschreiben die nötige thermische Energiemenge, die dem Einbautenmodul während der Verbrennung zugeführt werden muss, damit eine ausreichend hohe Temperatur im gesamten Einbautenmodul für die Oxidation der staub- und gasförmigen Bestandteile erreicht werden kann.

Die thermische Flächenbelastung ergibt sich aus der Energiemenge pro Zeiteinheit und aktiver Strömungsfläche.

Thermische Volumenbelastung \dot{q}_v :

$$\dot{q}_v = \frac{\dot{Q}_{Em}}{V_{Em}} = \frac{\dot{Q}_{Em}}{a_{Em} \times b_{Em} \times h_{Em}} \quad [\text{J/s.m}^3] \text{ oder } [\text{W/m}^3] \quad \text{Gleichung 2}$$

Thermische Flächenbelastung \dot{q}_A :

$$\dot{q}_A = \frac{\dot{Q}_{Em}}{A_{Em}} = \frac{\dot{Q}_{Em}}{a_{Em} \times b_{Em}} \quad [\text{J/s.m}^2] \text{ oder } [\text{W/m}^2] \quad \text{Gleichung 3}$$

$$\dot{Q}_{Em} = k_{ver} \times \dot{Q}_{ges.} = k_{ver} \times H_u \times \dot{m}_B \quad [\text{J/s}] \text{ oder } [\text{W}] \quad \text{Gleichung 4}$$

Wobei:

$\dot{Q}_{ges.}$: Der gesamte Wärmestrom bzw. die Wärmemenge pro Zeiteinheit, die bei der Verbrennung erzeugt wird. Bei der Verbrennung in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen wird die Wärme nicht gleichmäßig über die Verbrennungszeit (Abbranddauer) produziert. Im ersten Drittel der Abbrandzeit wird über 50 % der gesamten Wärme produziert. Eine wichtige Aufgabe der Einbautentechnik ist, diese Wärme zu speichern und bei Abnahme der Temperatur im letzten Drittel der Abbrandzeit aufgrund des Brennstoffverbrauchs abzugeben und die Oxidation entsprechend zu unterstützen.

\dot{Q}_{Em} : Der Wärmestrom bzw. Wärmemenge pro Zeiteinheit, die dem

- Einbautenmodul zugeführt wird.
- V_{Em} : Das aktive Volumen des Einbautenmoduls.
- A_{Em} : Die aktive Strömungsfläche des Einbautenmoduls.
- k_{ver} : Der Wärmeverlustfaktor beschreibt die Wärmeverluste in der Einzelraumfeuerungsanlage, bevor der Wärme- bzw. Abgasvolumenstrom dem Einbautenmodul zugeführt wird. Er hängt von der Art sowie der Konstruktion der Einzelraumfeuerungsanlage ab. Für Kamineinsätze und freistehende Raumheizer nimmt dieser Faktor je nach Auskleidung, Feuerraumgeometrie und Gesamtfläche der Glasscheiben einen Wert zwischen 0,30 und 0,65 an. Für Speicherfeuerstätten ist für diesen Faktor ein Wert zwischen 0,60 und 0,85 anzusetzen. Dieser Faktor sollte individuell von Herstellern gemäß der Art und Konstruktion ihrer Feuerungsanlagen ermittelt werden.
- H_u : Der untere Heizwert des Brennstoffs (beispielsweise verfügt das Buchenholz über einen Heizwert von ca. 15 MJ/kg bei einem Wassergehalt von 15 Ma.-%).

Beim Einsatz der Einbautentechnik in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen wird dem Verbrennungsprozess keine externe thermische Energie wie in klassischen thermischen Nachverbrennungsverfahren zugeführt. Die bei der Verbrennung entstehende Wärme soll so verwaltet werden, dass die nötigen Oxidationstemperaturen im gesamten Einbautenmodul eingestellt werden können. Die Überdimensionierung des Einbautenmoduls führt zwar zur Verlängerung der Verweilzeit des Abgases aber auch zu niedrigeren Temperaturen im Einbautenmodul. Um Ablagerungen von Ruß im Einbautenmodul zu vermeiden, muss dem Einbautenmodul während der Verbrennung eine ausreichende Wärmemenge (Temperaturen von mindestens 550 °C über einen Zeitraum von mindestens 5 Minuten) zugeführt werden, sodass eine effektive thermische Selbstreinigung erreicht werden kann.

Die optimale thermische Volumenbelastung des Einbautenmoduls sollte größer als 0,5 MW/m³ sein. Je größer die thermische Volumenbelastung des Einbautenmoduls, umso besser ist es für die thermische Selbstreinigung. Hier sollte darauf geachtet werden, dass die hohe thermische Volumenbelastung nicht zur Verkürzung der Verweilzeit und zur unnötigen Erhöhung des Druckverlusts im Einbautenmodul führen sollte. Außerdem kann es bei hoher Wärmekonzentration zur thermischen Belastung der Materialien des Einbautenmoduls bzw. der Einzelraumfeuerungsanlage kommen.

Thermische Selbstreinigung (Regenerierung)

Das Einbautenmodul soll während des Betriebs eine Temperatur von größer als 550 °C für mindestens 5 Minuten erreichen, sodass eine Selbstreinigung (thermische Regenerierung) stattfinden kann und Rußablagerungen über längere Betriebszeit (mind. 10.000 Betriebsstunden) vermieden werden können.

Bei der Integrierung der Einbautentechnik ist es wichtig, dass aufgrund der Erhöhung des Strömungswiderstands keine ungünstigen Strömungsverhältnisse in den Feuerungsanlagen entstehen, die die Verbrennungsluftzufuhr stören und die Abgasförderung aus der Feuerungsanlage behindern bzw. die Verbrennung folglich verschlechtern. Außerdem kann die Erhöhung des Strömungswiderstands besonders während des Nachlegens zum Austreten von Abgasen aus dem Feuerraum in den Wohnraum führen.

4.6.3 Berechnung und Dimensionierung des Einbautenmoduls

Unter der Dimensionierung des Einbautenmoduls, als essentieller Teil der Einbautentechnik, ist die Festlegung des Volumens sowie der Strömungsfläche des Einbautenmoduls zu verstehen. Die beiden Größen sollen so festgelegt werden, dass sowohl die minimale empfohlene thermische Flächenbelastung als auch der maximale Druckverlust eingehalten werden können. Die minimale thermische Flächenbelastung soll zusätzlich zu einer optimalen Oxidation die thermische Selbstreinigung bzw. Regenerierung des Moduls gewährleisten.

Zwischen dem Volumen des Einbautenmoduls V_{Em} , dem Abgasvolumenstrom \dot{V}_{Ag} und der Verweilzeit des Abgases im Einbautenmodul τ_{Ag} , besteht ein vereinfachter Zusammenhang, der anhand von Gleichung 5 beschrieben wird. Durch diesen Zusammenhang lässt sich das durchströmte Volumen des Einbautenmoduls berechnen. Es ist zu erwähnen, dass sich das durchströmte Volumen des Einbautenmoduls normalerweise aus der Differenz des Gesamtvolumens des Einbautenmoduls abzüglich des Volumens der Turbulatoren in den Einbauten bzw. der Füllkörper ergibt. Das Volumen der Turbulatoren ist allerdings im Vergleich zum gesamten Volumen des Einbautenmoduls sehr klein ($< 1,5\%$) und kann somit vernachlässigt werden.

$$V_{Em} = \dot{V}_{Ag} \times \tau_{Ag} \quad \text{Gleichung 5}$$

Wobei:

\dot{V}_{Ag} : Abgasvolumenstrom im Betriebszustand [m^3/s]
 V_{Em} : Durchströmtes Volumen des Einbautenmoduls [m^3]
 τ_{Ab} : Verweilzeit des Abgases im Einbautenmodul [s]

Die Verweilzeit soll so ausgesucht werden, dass die thermische Volumen- und Flächenbelastung des Einbautenmoduls in einem günstigen Bereich für einen möglichst optimalen Betrieb liegen sollten (siehe Abschnitt 4.6.2).

4.6.3.1 Berechnung des Abgasvolumenstroms:

Zur Berechnung des Abgasvolumenstroms können die Näherungsgleichungen von Rosin-Fehling verwendet werden. Für die Verbrennung von festen Brennstoffen gilt nach Rosin-Fehling die Gleichung 6.

$$V_{Ag, spez} = \left[\frac{0,217 \times H_u}{1.000} + 1,67 \right] + (\lambda - 1) \times \left[\frac{0,241 \times H_u}{1.000} + 0,5 \right] \quad \text{Gleichung 6}$$

Wobei:

$V_{Ag, spez}$: Spezifisches Abgasvolumen [Nm^3/kg]

λ : Lambda oder Luftverhältniszahl [-]. Bei der Verbrennung in Einzelraumfeuerungsanlagen schwankt die Luftverhältniszahl während der Verbrennung in der Regelbetriebsphase zwischen 1,7 und 3,2.

H_u : Der untere Heizwert [kJ/kg] des Brennstoffs. Der untere Heizwert kann anhand der Elementaranalyse des Brennstoffs gemäß Gleichung 7 berechnet oder mit einem Bombenkalorimeter gemessen werden.

$$H_u = 339c + 105s + 1.214(h - o/8) - 24,5w \quad \text{Gleichung 7}$$

Wobei: c, s, h, o und w sind die Massenanteile des Kohlenstoffs, des Schwefels, des Wasserstoffs, des Sauerstoffs und des Wassers in der analysierten Brennstoffprobe.

Die spezifische Abgasmenge [kg/m^3] von Biomasse lässt sich auch durch die relevanten chemischen Reaktionen berechnen, die bei der Verbrennung stattfinden. Dafür wird eine genaue Brennstoffanalyse bzw. die Elementarzusammensetzung des Brennstoffs benötigt. Für die Berechnung des spezifischen Abgasvolumens im feuchten Zustand [m^3/kg] aus der Verbrennung von Biomasse kann die Gleichung 8 eingesetzt werden.

$$V_{Ag, spez} = 5,6h + 0,7o + 1,24w + \lambda \times (8,9c + 26,66h + 3,33s - 3,33o) \quad \text{Gleichung 8}$$

Der Vorteil der Näherungsgleichungen von Rosin-Fehling liegt darin, dass die spezifische Abgasmenge nur durch den Energiegehalt des Brennstoffs bzw. durch den unteren Heizwert berechnet werden kann. Außerdem sind die Näherungsgleichungen für heterogene Brennstoffe besonders genau.

Der gesamte Abgasvolumenstrom ergibt sich aus dem Brennstoffdurchsatz [kg Brennstoff/s] und dem spezifisches Abgasvolumen [Nm^3/kg]:

$$V_{Ag, N} = V_{Ag, spez} \times \dot{m}_B \quad \text{Gleichung 9}$$

Wobei:

$V_{Ag, ges.}$: Spezifisches Abgasvolumen [Nm^3/s]

\dot{m}_B : Brennstoffdurchsatz [kg/s]. Beim Chargenbetrieb erfolgt der Brennstoffdurchsatz bzw. -verbrauch nicht gleichmäßig über die Abbranddauer. Der Brennstoffdurchsatz ist gleich die beschickte Brennstoffmenge geteilt durch die Abbranddauer.

Für die Auslegung bzw. Dimensionierung des Einbautenmoduls soll der Abgasvolumenstrom im Normzustand auf Betriebszustand gemäß Gleichung 10 umgerechnet werden. Dabei ist der Einfluss der Betriebstemperatur t_{Ag} sowie des Betriebsdrucks p_{Ag} zu berücksichtigen.

$$\dot{V}_{Ag} = \dot{V}_{Ag,N} \times \frac{273,15 + t_{Ag}}{273,15} \times \frac{101325}{101325 + p_{Ag}} \quad \text{Gleichung 10}$$

Der Einfluss des Drucks auf die Abgasdichte bzw. den Abgasvolumenstrom ist bei diesem Anwendungsfall sehr gering und kann bei der Auslegung der Einbautentechnik zum Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen vernachlässigt werden. Aus der Gleichung 6, der Gleichung 9 und der Gleichung 10 ergibt sich die Gleichung 11, die für die Berechnung des Abgasvolumenstroms Bm^3/s im Betriebszustand verwendet werden kann:

$$\dot{V}_{Ag} = \dot{m} \times \left[\left(\frac{0,217 \times H_u}{1.000} + 1,67 \right) + (\lambda - 1) \times \left(\frac{0,241 \times H_u}{1.000} + 0,5 \right) \right] \times \frac{273,15 + t_{Ag}}{273,15}$$

Gleichung 11

Oder gemäß **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, der Gleichung 9 und der Gleichung 10:

$$\dot{V}_{Ag} = \dot{m} \times [5,6h + 0,7o + 1,24w + \lambda \times (8,9c + 26,7h + 3,3s - 3,3o)] \times \frac{273,15 + t_{Ag}}{273,15}$$

Gleichung 12

Die Gleichung 11 und die Gleichung 12 liefern miteinander vergleichbare Werte und lassen sich für technische Systemauslegungen und sonstige praktische Zwecke sehr gut und mit hinreichender Genauigkeit einsetzen.

4.6.3.2 Verweilzeit und Platzierung des Einbautenmoduls in der Feuerungsanlage

Bei den herkömmlichen thermischen Oxidationsverfahren hängt die nötige Verweilzeit von der Art der Schadstoffe sowie der erforderlichen maximalen Schadstoffkonzentration im Reingas ab. Dabei wird mit konstanten Temperaturen oder bestimmten Temperaturbereichen gearbeitet, die durch Zufuhr zusätzlicher Energie in den Prozess bereitzustellen sind. Eine längere Verweilzeit erfordert bei gleichem Abgasvolumenstrom eine größere

Oxidationskammer. Dies erfordert höhere Investitionskosten. Im Gegensatz dazu führt eine Verkleinerung des Oxidationskammervolumens zu einer kürzeren Verweilzeit. Bei gleichen geforderten Konzentrationen der Schadstoffe im Reingas ist dann hingegen eine höhere Reaktionstemperatur erforderlich. Dadurch steigen die Betriebskosten des Oxidationsprozess an. Hier ist das Optimum bezüglich der Investitions- und Betriebskosten zu ermitteln.

Beim Einsatz von thermischen Oxidationsverfahren in Kleinf Feuerungsanlagen handelt es sich um einen völlig anderen Anwendungsbereich sowie um andere Betriebs- und Einsatzbedingungen. Dabei wird dem chargenbetriebenen Prozess keine zusätzliche Energie zugeführt. Die bei der Verbrennung freiwerdende Energie wird während der Verbrennung in den Einbauten gespeichert und bei Bedarf bzw. bei Absenkung der Temperatur automatisch in den Abgasvolumenstrom abgegeben. Die Verweilzeit bei diesem speziellen Einsatz kann nicht beliebig ausgesucht werden. Im gesamten Oxidationsreaktor bzw. in strömungsrelevanten Bereichen des Einbautenmoduls sollen über einen Zeitraum von mindestens 5 Minuten Temperaturen von 600 °C erreicht werden, sodass organische Feinstaubablagerungen abgebrannt werden und sich das Einbautenmodul selbst reinigen kann. Kalte Bereiche im oberen Teil des Einbautenmoduls führen zur Bildung von Ablagerungen und folglich zur Erhöhung des Strömungswiderstands mit zunehmender Betriebszeit. Bei vielen Feuerungsanlagen lässt sich eine Verweilzeit von bis zu 0,7 Sekunden realisieren, ohne dass es dabei zu Ruß- oder Feinstaubablagerungen kommt. In manchen Fällen spielt das Design bei dem maximalen in der Feuerungsanlage zu realisierenden Volumen des Einbautenmoduls eine große Rolle.

Bei der Platzierung des Einbautenmoduls in der Feuerungsanlage soll darauf geachtet werden, dass dadurch die Verbrennungsluftzufuhr sowie die Abgasabfuhr nicht gestört werden dürfen. Für einen adäquaten Betrieb der Feuerungsanlage mit der Einbautentechnik sind angemessene Strömungsverhältnisse erforderlich. Bei Feuerungsanlagen mit wasserführenden Bauteilen dürfen aufgrund der Wärmekonzentration im Einbautenmodul keine Hotspots gebildet werden, die zum lokalen Kochen des Wassers im Wärmeaustauscher führen. Dadurch entstehen nicht nur unangenehme Schallemissionen sondern auch lokale thermische Überlastungen des Wärmeaustauschers. Das Einbautenmodul muss vor dem Wärmeaustauscher zugänglich eingebaut werden, um die erforderlichen Oxidationstemperaturen zu gewährleisten bzw. den Austausch beim Auftreten von Schäden zu ermöglichen. Es sollte auch darauf geachtet werden, dass die Strömungs- und somit Wärmeverteilung nach dem Einbautenmodul gleichmäßig bleibt, sodass eine möglichst hohe und effiziente Wärmeübertragung erreicht werden kann.

4.6.4 Ermittlung des Druckverlusts

Zur Abschätzung des Druckverlusts im Einbautenmodul bei einer deterministischen Anordnung der Füllkörper (bzw. Pall-Ringe) lässt sich Gleichung 13 verwenden. Diese vereinfachte Gleichung ist von der allgemeinen Gleichung für die Berechnung des Druckverlusts in einphasiger Strömung abgeleitet. Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Das Abgas ist nicht kompressibel. Diese Annahme lässt sich bei niedrigen Abgasgeschwindigkeiten und –drücken mit Mach-Zahlen (Verhältnis von der Strömungsgeschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit) kleiner als 0,3 treffen.
- Es treten sehr geringe Wärmeverluste innerhalb des Einbautenmoduls auf (das Filter-Reaktorsystem ist als adiabatisches System zu betrachten).
- Das Abgas verhält sich als ideales Gas. Das Abgas kann bis zu einem Druck von 10 bar als ideales Gas angenommen werden (Regelgasfaktor $Z=1$).

$$\Delta p_{Em} = k \cdot \frac{h_{Em}}{d_F \cdot \sqrt{n}} \cdot \frac{\rho_{Ag} \cdot g_{Em}^2}{2} \quad \text{Gleichung 13}$$

Wobei:

Δp_{Em} : Druckverlust im Einbautenmodul [Pa]

k : Druckverlustbeiwert [-], Für Pall-Ringe (50 mm) nimmt der Druckverlustbeiwert einen Wert zwischen 25 und 45 an. Für metallische Pall-Ringe (35 mm) ist einen Wert für diesen Faktor zwischen 15 und 35 einzusetzen. Diese Werte sind empirisch im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP unter bekannten und reproduzierbaren Bedingungen durch den Einsatz eines Abgassimulators ermittelt worden. Sie gelten nur für deterministisch angeordnete metallische und keramische Pall-Ringe.

h_{Em} : Höhe des Einbautenmoduls [m].

n : Anzahl der Einbauten (Pall-Ringe) im Querschnitt bzw. in einer Reihe im Querschnitt des Einbautenmoduls [-].

d_F : Druckmesser des Füllkörpers bzw. des Pall-Rings [m].

g_{Em} : Abgasgeschwindigkeit im Einbautenmodul. Die Abgasgeschwindigkeit ist gleich dem Abgasvolumenstrom geteilt durch die aktive Strömungsfläche [m/s].

Die Abgasdichte ρ hängt nicht nur von der Zusammensetzung des Abgases sondern auch von der Temperatur und dem Druck ab. Je höher die Abgastemperatur ist, umso geringer wird die Dichte des Abgases (Diagramm 5). Die Abgasdichte steigt mit zunehmendem Abgasdruck im Reaktor an. Der Einfluss des Drucks auf die Abgasdichte bzw. den Abgasvolumenstrom ist sehr gering und kann bei der Auslegung der Einbautentechnik zum Einsatz in

Einzelraumfeuerungsanlagen vernachlässigt werden. Bei der Verbrennung von Weich- und Harthölzern in Einzelraumfeuerungsanlagen kann näherungsweise die Gleichung 14 verwendet werden.

$$\rho_{Ag} = \frac{(p_u + \Delta p_{ag})}{(273,15 + t_{Ag}) \times R_i} = \frac{101.325 \pm 30}{(273,15 + t_{Ag}) \times 281} \quad \text{Gleichung 14}$$

Das Diagramm 5 zeigt die Dichte des Abgases bei der Verbrennung von weichen und harten Hölzern in Einzelraumfeuerungsanlagen in Abhängigkeit von der Abgastemperatur.

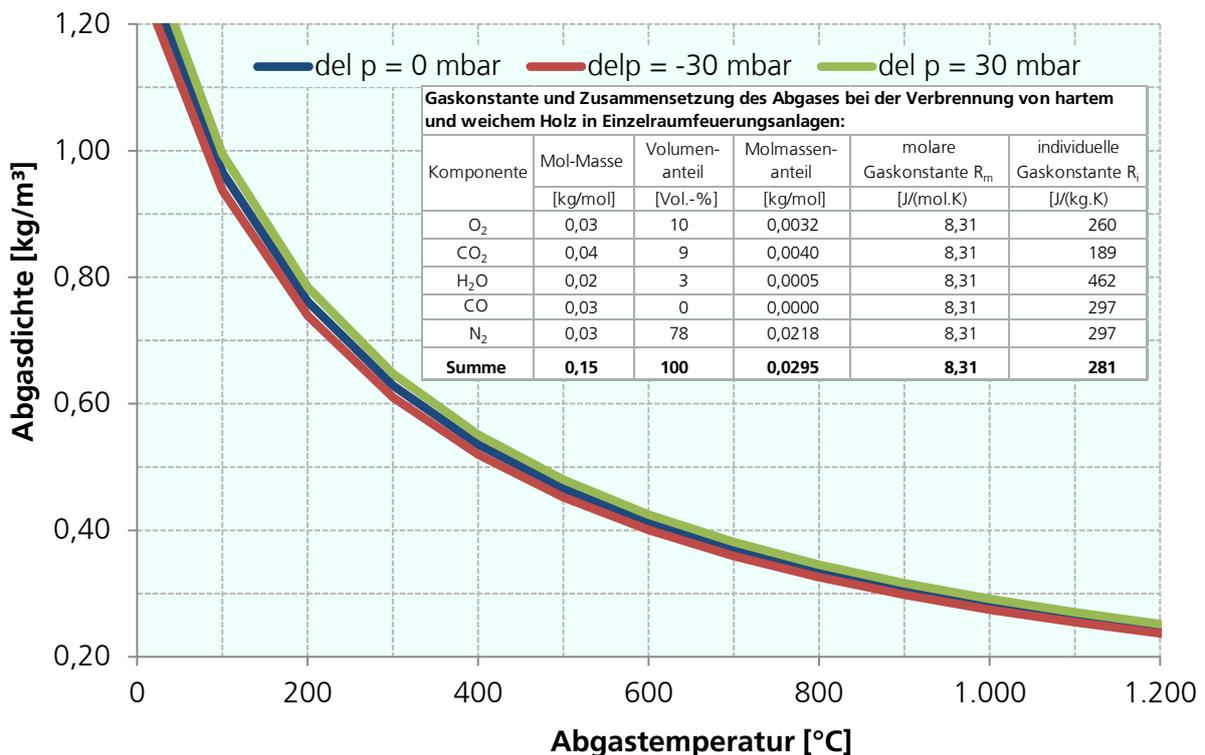


Diagramm 5: Dichte des Abgases bei der Verbrennung von weichem und hartem Holz in Einzelraumfeuerungsanlagen.

$$\Delta p_{Em} = k \cdot \frac{h_{Em}}{d_F \cdot \sqrt{n}} \cdot \frac{\left[\frac{101.325}{(273,15 + t_{ag}) \times 281} \right] \times \left[\frac{4 \times V_{Ag}}{n \times \pi \times d_F^2} \right]^2}{2} \quad \text{Gleichung 15}$$

Das Diagramm 5 gilt nur für metallische (Pall-Ring 35 mm) und keramische Füllkörper (Pall-Ring 50 mm) mit deterministischer Anordnung innerhalb des Einbautenmoduls unabhängig von dem Anwendungsgebiet. Für praktische Zwecke lässt sich der Druckverlust im Einbautenmodul anhand der Gleichung 15 hinreichend genau abschätzen.

Der Druckverlust kann empirisch anhand der Kurven des aerodynamischen Verhaltens ermittelt werden (siehe Abschnitt 4.6.5).

4.6.5 Aerodynamisches Verhalten

Das aerodynamische Verhalten beschreibt den Druckverlust und die Druckverlustentwicklung durch die integrierte Technik in allen Betriebsphasen der Einzelraumfeuerungsanlage bzw. im Neuzustand, während des Betriebs und nach der Reinigung der Struktur. Der Druckverlust stellt eine wichtige Größe für die Auslegung der integrierten Technologien dar. Bei der Auslegung soll der Druckverlust unter einer Grenze von (< 3 Pascal) bleiben und sich während des Betriebs konstant verhalten.

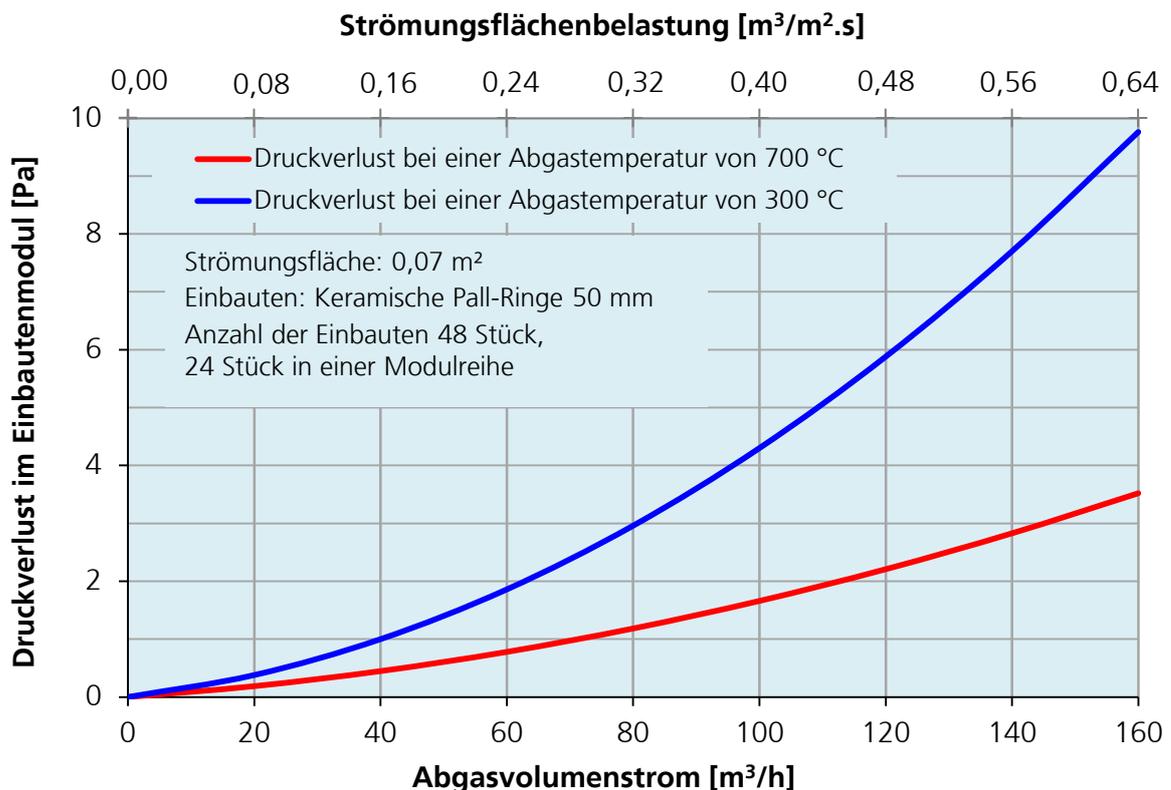


Diagramm 6: Druckverlust der keramischen Pall-Ringe 50 mm im Neuzustand.

Im Rahmen dieses Projekts wurde das Verhalten für ein beispielhaftes Einbautenmodul ermittelt. Die Messergebnisse sind im Diagramm 6 dargestellt.

Im Diagramm 6 sind beispielhaft die Druckverlustkurven im Neuzustand beim Einsatz von 48 keramischen Einbauten (24 Einbauten pro Modulreihe) bei Abgastemperaturen von 300 °C und 700 °C dargestellt. Es ist in diesem Diagramm ersichtlich, dass der Druckverlust bei der Abnahme der Abgastemperaturen zunimmt bzw. bei der Zunahme der Abgastemperaturen ansteigt. Wird der Abgasvolumenstrom erhöht, nimmt der Druckverlust quadratisch zur Strömungsgeschwindigkeit im Einbautenmodul zu. Außerdem nimmt der Druckverlust mit zunehmender Strömungsflächenbelastung zu.

Durch die richtige Auswahl der Strömungsfläche bzw. die Anzahl der Einbauten in einer Modulreihe lässt sich der günstigste Druckverlust (maximal 3 Pascal im Neuzustand) für einen sicheren Betrieb berechnen.

Ausgehend von den oben geschilderten Ergebnissen ergibt sich, dass durch die ausgewählte Konstruktion des Einbautenmoduls günstige Strömungsverhältnisse und somit ein geringer Druckverlust erreicht werden können.

4.6.6 Auslegungsbeispiel

In diesem Auslegungsbeispiel wird die Einbautentechnik für einen Kamineinsatz mit den folgenden Angaben ausgelegt:

- Feuerungsanlagen: Kamineinsatz gemäß DIN EN 13229
- Auskleidung Schamotte und Vermiculit
- Zwei Glasscheiben 80 cm x 35 cm
- Brennstoffverbrauch: 4,5 kg/h
- Gesamtwärmeleistung 17 kW
- Größe des Feuerraumbodens: a: 30 cm x b: 80 cm x h: 50 cm
- Buchenscheitholz mit einem Heizwert von ca. 16.500 kJ/kg
- Luftüberschusszahl bzw. Lambda: 2,2 [-]
- Einbauten sind keramische Pall-Ringe 50 mm.

Berechnung des Einbautenmoduls:

Das aktive Volumen des Einbautenmoduls ergibt sich aus der Gleichung 5:

$$V_{Em} = \dot{V}_{Ag} \times \tau_{Ag}$$

Der Abgasvolumenstrom im Betriebszustand bzw. bei einer Abgastemperatur von 700 °C lässt sich durch die Gleichung 11 oder die Gleichung 12 berechnen:

Gemäß der Gleichung 11 ergibt sich ein Abgasvolumenstrom von:

$$\dot{V}_{Ag} = \dot{m} \times \left[\left(\frac{0,217 \times H_u}{1.000} + 1,67 \right) + (\lambda - 1) \times \left(\frac{0,241 \times H_u}{1.000} + 0,5 \right) \right] \times \frac{273,15 + t_{Ag}}{273,15}$$

$$\dot{V}_{Ag} = 4,5 \times \left[\left(\frac{0,217 \times 16.500}{1.000} + 1,67 \right) + (2,2 - 1) \times \left(\frac{0,241 \times 16.500}{1.000} + 0,5 \right) \right] \times \frac{273 + 700}{273}$$

$$\dot{V}_{Ag} = 4,5 \frac{[kg]}{[h]} \times 10,62 \frac{[Nm^3]}{[kg]} \times 3,56 \frac{[Bm^3]}{[Nm^3]} = 170 \text{ [Bm}^3/\text{h]} = 0,047 \text{ [Bm}^3/\text{s]}$$

Es muss eine thermische Volumenbelastung von größer als $0,5 \text{ MW/m}^3$ eingehalten werden. Hier gilt, je größer die thermische Volumenbelastung, umso höhere Temperaturen können im Einbautenmodul eingestellt und desto besser können Oxidationsprozesse stattfinden. Es sei angenommen, dass die Verweilzeit t_{Ag} des Abgases im Einbautenmodul drei Sekunden beträgt. Nach dieser Annahme ergibt sich ein Volumen für das Einbautenmodul von:

$$V_{Em} = 0,047 \frac{[m^3]}{[s]} \times 0,3[s] = 0,014 [m^3]$$

Bei einem Volumen des Einbautenmoduls von $0,047 \text{ m}^3$ und einem Wärmeverlustfaktor k_{ver} von $0,45$ ergibt sich eine thermische Volumenbelastung von:

$$q_v = \frac{k_{ver} \times H_u \times m_B}{V_{Em}} = \frac{0,45 \times 16,5 \frac{[MJ]}{[kg]} \times 4,5 \frac{[kg]}{[h]}}{0,014 [m^3]} = 2.387 \frac{[MJ]}{[m^3] \times [h]},$$

das entspricht einer thermischen Volumenbelastung von ca. $0,67 \text{ MW/m}^3 > 0,5 \text{ MW/m}^3$.

Ein Pall-Ring besitzt ein Volumen von $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Das heißt, in einem Volumen des Einbautenmoduls vom $0,014 \text{ m}^3$ lassen sich 70 Pall-Ringe einsetzen.

Gesamtanzahl der Pall-Ringe bzw. Füllkörper

$$\frac{0,014 [m^3]}{2 \times 10^{-4} \frac{[m^3]}{[Stück]}} = 70 [Stück]$$

Diese können in zwei übereinanderliegenden Reihen, mit jeweils 35 Stück in jeder Reihe (5 x 7 Pall-Ringe) geordnet werden.

Bei 35 Pall-Ringen im Querschnitt ergibt sich eine Strömungsfläche von

$$A_{Em} = 35 \times \frac{\pi \times d_F^2}{4} = 0,069 [m^2]$$

Gemäß der Gleichung 1 ergibt sich eine Strömungsflächenbelastung von:

$$g_{Em} = \frac{\dot{V}_{Ag}}{A_{Em}} = \frac{0,047}{0,069} = 0,7 [m^3/m^2 \cdot s]$$

Gemäß der Gleichung 15 wird je nach Druckverlustbeiwert k ein maximaler Druckverlust zwischen $0,7$ Pascal bei einem Druckverlustbeiwert von 25 und $1,2$ Pascal bei einem Druckverlustbeiwert von 65 im Einbautenmodul erzeugt.

$$k = 25 \Rightarrow$$

$$\Delta p_{Em} = 25 \times \frac{0,1}{0,05 \times \sqrt{35}} \cdot \frac{\left[\frac{101325}{(273,15 + 700) \times 281} \right] \times \left[\frac{4 \times 0,047}{35 \times \pi \times 0,05^2} \right]^2}{2} = 0,7 \text{ [Pa]}$$

$$K = 45 \Rightarrow$$

$$\Delta p_{Em} = 45 \times \frac{0,1}{0,05 \times \sqrt{35}} \cdot \frac{\left[\frac{101325}{(273,15 + 700) \times 281} \right] \times \left[\frac{4 \times 0,047}{35 \times \pi \times 0,05^2} \right]^2}{2} = 1,2 \text{ [Pa]}$$

Bei einer anderen Anordnung der Pall-Ringe wie beispielsweise (3 Reihen und pro Reihe 25 Pall-Ringe) wird ein maximaler Druckverlust zwischen 2,5 Pascal bei einem Druckverlustbeiwert von 25 und 4,5 Pascal beim Druckverlustbeiwert von 45 im Einbautenmodul erzeugt. Durch diese Anordnung wurde die Strömungstrecke um ca. 30 % vergrößert bzw. die Strömungsfläche um ca. 30 % reduziert.

$$k = 25 \Rightarrow$$

$$\Delta p_{Em} = 25 \times \frac{0,15}{0,05 \times \sqrt{25}} \cdot \frac{\left[\frac{101325}{(273,15 + 700) \times 281} \right] \times \left[\frac{4 \times 0,047}{25 \times \pi \times 0,05^2} \right]^2}{2} = 2,5 \text{ [Pa]}$$

$$k = 45 \Rightarrow$$

$$\Delta p_{Em} = 45 \times \frac{0,15}{0,05 \times \sqrt{25}} \cdot \frac{\left[\frac{101325}{(273,15 + 700) \times 281} \right] \times \left[\frac{4 \times 0,047}{25 \times \pi \times 0,05^2} \right]^2}{2} = 4,5 \text{ [Pa]}$$

Die zuletzt betrachtete Anordnung der Pall-Ringe (3 Reihen und pro Reihen 25 Pall-Ringe) ist möglich, aber grenzwertig bezüglich des empfohlenen Druckverlustes, da ein Druckverlust von über 3 Pascal entstehen kann.

Es ist zu erwähnen, dass die im Abschnitt 4.6 beschriebene Methode zur Auslegung der Einbautentechnik für praktische Zwecke hinreichend und sehr zuverlässig ist. Die genaueren Werte (wie z. B. Druckverlustbeiwerte, optimale thermische Volumenbelastung und Strömungsflächenbelastung) für die Auslegungsfaktoren sollten unter realen reproduzierbaren Bedingungen anhand des Einsatzes einer Forschungsfeuerstätte und durch die Verbrennung unterschiedlicher Hölzer validiert werden. Diese Forschungsfeuerstätte soll die genauen Einstellungen und Messungen der wichtigsten Verbrennungsparameter (Verbrennungsluft- und Abgaswerte) ermöglichen und so flexibel aufgebaut werden, dass die Verbrennungsluft (Primär-,

Sekundär- und Tertiärluft) auf unterschiedliche Weise wie z. B. über die Türscheibe als Scheibenspülluft, durch den Verbrennungsrost oder durch die Wände der Feuerstätten (kalt oder vorgewärmt) geregelt zugeführt werden kann. Zusätzlich sollen in dieser Forschungsfeuerstätte unterschiedliche Auskleidungsmaterialien und Türenauführungen erprobt werden. Die Entwicklung dieser Forschungsfeuerstätte mit den dazugehörigen Untersuchungen und Ermittlungen kann im Rahmen weiterer Forschungsprojekte mit der Teilnahme interessierter Industriepartner erfolgen.

5 Technische Einrichtungen zur Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten technischen Bestandteile beschrieben, die für die Versuchsdurchführung und Auswertung eingesetzt wurden.

5.1 Versuchsmesseinrichtung

Zur Durchführung der Verbrennungsversuche unter einheitlichen und reproduzierbaren Bedingungen wurde ein Prüfstand gemäß DIN EN 13240 sowie DIN EN 15250 mit den entsprechenden Abgasmesssystemen und Auswerteprogrammen verwendet. Außerdem wurde zur Messung bzw. Langzeitählung (über mehrere Abbrände) von Feinstäuben (zwischen 5 nm und 350 nm) ein spezielles Verdünnungstunnelsystem eingesetzt.

5.1.1 Versuchs- und Prüfstand

Der Prüfstand besteht aus einem speziellen Prüfboden und zwei Prüfwänden, welche jeweils rechtwinklig zueinander angeordnet sind. Die Einzelraumfeuerungsanlagen werden so aufgestellt, dass die vom Hersteller geforderten Mindestabstände vom Prüfboden und zu den Seitenwänden bzw. zu brennbaren Materialien eingehalten werden. Die Untersuchung einer Veränderung des Strahlungsverhaltens durch den Einsatz der Einbautentechnik ist insofern wichtig, als dass Hotspots im Bereich der Einbauten in den Einzelraumfeuerungsanlagen aus Sicherheitsgründen vermieden werden sollten.

Die Einzelraumfeuerungsanlagen sind über Abgasstutzen jeweils mit einer Messstrecke verbunden, an denen zusätzlich zur Messung des Abgasförderdrucks und der mittleren Abgastemperatur, eine kontinuierliche Abgasprobe für die Abgasanalyse entnommen wird. Die Mess- und Entnahmestellen sind gemäß den Prüfnormen und in Abhängigkeit von dem Durchmesser des Abgasstutzens zu wählen. Die Abgasprobenentnahme zur gravimetrischen Messung des Staubs erfolgt nach der Abgasprobeentnahme.

Mittels einer Abbrandwaage kann die Abnahme der Brennstoffmasse über den Verbrennungsvorgang ermittelt bzw. aufgezeichnet werden. Dadurch wird eine einheitliche Durchführung (Neubeschickung bei gleicher Brennstoffmasse) bzw. hohe Repräsentativität und Wiederholbarkeit der Versuchsergebnisse gewährleistet.

5.1.2 Abgasanalyse

Die verwendeten Prüfstände zur Durchführung der Messungen sind mit hochgenauen Messeinrichtungen zur Erfassung von staub- und gasförmigen Emissionen sowie Abgasparametern (wie z. B. Druck, Temperatur, Abgasgeschwindigkeit, Abgasvolumenstrom usw.) ausgerüstet.

Zur Analyse von Abgasen werden heißextraktive Analysegeräte (GASMET: TTGASSYS001 der Firma Ansyco), als auch kaltextraktive Abgasanalysegeräte (Advanc Optima AO 200 der Firma ABB AUTOMATION) eingesetzt. Beide Abgasanalysegeräte sind für den Einsatz unter rauen Betriebsbedingungen sowie für den Dauerbetrieb geeignet. Folgende Abgaskomponenten lassen sich kontinuierlich und mit hoher Genauigkeit messen.

- Typische Verbrennungsprodukte: Kohlendioxid (CO_2), Wasserdampf (H_2O) und Sauerstoff (O_2).
- Brennbare Abgaskomponenten aus unvollständiger Verbrennung: Kohlenstoffmonoxid (CO), Gesamtkohlenwasserstoffe (C_nH_m), 28 spezifisch gefährliche Kohlenwasserstoffverbindungen (u.a. auch Polyzyklisch Aromatische Kohlenwasserstoffe).
- Nicht-brennbare saure Abgaskomponenten: Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO_2), Schwefeldioxid (SO_2), Chlorwasserstoff (HCl) und Fluorwasserstoff (HF).
- Zur Messung der Gesamtkohlenwasserstoffe (C_nH_m) wird auch der Kohlenwasserstoff-Analysator Thermo-FID der Firma SK-Elektronik eingesetzt. Je nach verwendetem Kalibriergas werden die gemessenen Konzentrationen entweder als Methan (CH_4)- oder als Propan (C_3H_8)-Äquivalente angegeben. Außerdem können sonstige Abgasbestandteile wie z. B. Ammoniak (NH_3), Distickstoffmonoxid (N_2O), Ethen (C_2H_4), Ethan (C_2H_6), Pentan (C_5H_{12}), Methanol (CH_4O) oder Formaldehyd (CH_2O) mit dem Abgasanalysator der Firma Ansyco (FTIR-Spektroskopie) nach einer entsprechenden Kalibrierung erfasst werden.

Bei der Messung von Staubpartikeln ist zwischen groben Stäuben ($> 1 \mu\text{m}$) und Feinstäuben (zwischen 5 nm und $1 \mu\text{m}$) zu unterscheiden. Grobe Stäube lassen sich gravimetrisch sehr gut erfassen. Feinstäube können nur zum geringen Teil auf dem Planfilter abgeschieden und somit kaum gravimetrisch gemessen werden. Aus diesem Grund werden Feinstäube durch eine Staubzählmethode erfasst.

Die gravimetrische Staubmessung erfolgt nach VDI 2066-1. Hier wird das System SM 96 der Firma Wöhler verwendet. Die Entnahmesonde des Messgerätes wird in der Mitte des Abgasstroms befestigt. Das Staubentnahmesystem saugt die Staubproben mit einem Gesamtabaugvolumen von 270 Liter an. Die entnommenen Staubproben werden in einem Glasfilter gesammelt. Die Staubkonzentration ergibt sich aus der Gewichts Differenz von einer getrockneten Staubhülle vor und nach einer

30 minütigen Probenentnahme. Die daraus resultierende Massendifferenz wird anschließend auf das abgesaugte Abgasvolumen bezogen.

5.1.3 Staubzählverfahren zur Messung von Feinstäuben (5 nm bis 350 nm)

Eine gravimetrische Erfassung von Staubpartikel ist bis zu einem Partikelgrößenbereich $>1 \mu\text{m}$ möglich. Unterhalb dieses Größenbereichs ist die gravimetrische Erfassung von Stäuben technisch nur sehr eingeschränkt bzw. nicht repräsentativ möglich. Zur Erfassung der Feinstäube wird das SMPS-Spektrometer (Scanning Mobility Particle Sizer) der Firma GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG eingesetzt. Bei dem SMPS handelt es sich um einen Kondensationspartikelzähler (CPC: Condensation Particle Counter), der mit einem differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA: Differential Mobility Analyser) zur Ermittlung der Korngrößenverteilung gekoppelt ist. Das SMPS ermöglicht die Messung der Feinstaubkonzentrationen (Partikelgröße von 5 nm bis $1 \mu\text{m}$) sowie die Bestimmung der Korngrößenverteilung für einen Partikelgrößenbereich von 5 nm bis 350 nm. Da das SMPS-Spektrometer für die direkte Messung von Abgasproben für längere Zeit nicht geeignet ist, wird zusätzlich ein spezieller Verdünnungstunnel verwendet (Abbildung 12).

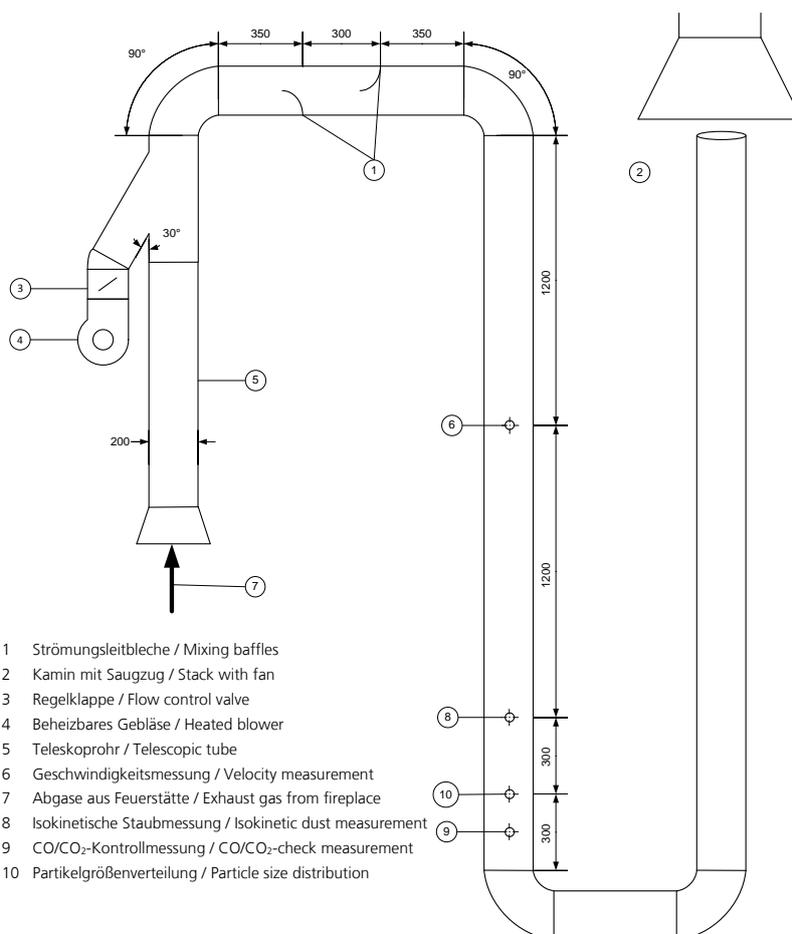


Abbildung 12: Verdünnungstunnel zur langzeitigen Feinstaubzählung in Anlehnung an die norwegische Norm NS 3058-2.

Dieser Verdünnungstunnel ist gemäß der norwegischen Norm NS 3058-2 so gebaut worden, sodass er sich sowohl zur Langzeit-Staubzählung als auch zur gravimetrischen Erfassung von Stäuben nach VDI 2066-1 einsetzen lässt. Er ermöglicht eine kontinuierliche Messung im Dauerbetrieb bzw. über mehrere Abbrände ohne technische Komplikationen im Staubzähler.

Die Besonderheiten des verwendeten Verdünnungstunnels liegen darin, dass die Verdünnung sowohl mit vorgewärmter als auch mit kalter Umgebungsluft erfolgen kann, sodass der Einfluss der Agglomeration während der Messung gemindert wird. Außerdem wird die Verdünnungsluft bei beiden Varianten vorgefiltert, sodass eine konstante Grundbelastung während der Messung eingehalten werden kann.

Der Verdünnungsfaktor für die Umrechnung der Feinstaubkonzentrationen ergibt sich aus dem Verhältnis der CO₂-Konzentrationen aus der Abgasmessstrecke zu jener Konzentration aus dem Verdünnungstunnel.

5.2 Versuchsverbrennungsanlagen (Einzelraumfeuerungsanlagen)

Zur Ermittlung der praktischen Umsetzbarkeit der Einbautentechnik wurden zwei unterschiedliche Anlagentypen von Einzelraumfeuerungsanlagen eingesetzt. Unter diesen Anlagentypen werden hinsichtlich der Betriebsweise alle gängigen Einzelraumfeuerungsanlagen berücksichtigt. Bei dem ersten Anlagentyp handelt es sich um Feuerungsanlagen mit einer schnellen Wärmeabgabe im Aufstellraum wie beispielsweise freistehende Raumheizer gemäß DIN EN 13240 sowie Kamineinsätze und offene Kamine gemäß DIN EN 13229, welche in der Regel alle 35 Minuten bis 60 Minuten mit Holz beschickt werden, um den Wärmebedarf zu decken. Zum anderen Anlagentyp gehören Feuerungsanlagen mit einer langsamen Wärmeabgabe im Aufstellraum wie z. B. Grund- und Speicheröfen gemäß DIN EN 15250. Diese Feuerungsanlagen werden täglich bis zu 150 Minuten mit einer bestimmten Holzmenge, nach Herstellerangaben, betrieben. Die in der Speichermasse gespeicherte Wärme wird über den gesamten Tag langsam an Aufstellraum abgeben. Die auf dem Markt erhältlichen Anlagen haben eine thermische Leistung von bis zu 5 kW_{th}.

In diesem Abschnitt werden die technischen Daten der als Versuchsverbrennungsanlagen eingesetzten Einzelraumfeuerungsanlagen (Raumheizer nach DIN EN 13240, Speicherfeuerstätte nach DIN EN 15250) vorgestellt, in denen die Einbautentechnik getestet wurde.

5.2.1 Versuchsverbrennungsanlagen mit einer schnellen Wärmeabgabe im Aufstellraum, freistehender Raumheizer nach DIN EN 13240

Als Versuchsanlage wurde ein Raumheizer (Prototyp) der Firma Wodtke GmbH mit Flachfeuerung eingesetzt (Abbildung 13). Dieser Prototyp wurde für einen raumluftabhängigen sowie –unabhängigen Betrieb entwickelt und für eine thermische Leistung zwischen 8 kW und 10 kW zur Verbrennung von naturbelassenem Holz (Holzscheite mit einer maximalen Länge von 25 cm) ausgelegt. Der Verbrennungsprozess wird mit Verbrennungsluft über den

Rost (Rostluft), über die vordere Türglasscheibe (als Scheibenspülluft) sowie über die hintere Seite des Raumheizers (als Sekundärluft) versorgt. Nach der Sekundärluftzugabe strömt das Abgas durch eine Nachbrennkammer, bevor dieses über das Abgasabfuhrsystem in die Umgebung abgeleitet wird. Die Nachbrennkammer verfügt über ein Volumen von ca. 12 Litern sowie eine Revisionsöffnung, welche eine leichte Integrierung der Einbautentechnik ermöglicht. In dieser Nachbrennkammer werden in der Regel Abgasprallplatten eingebaut.

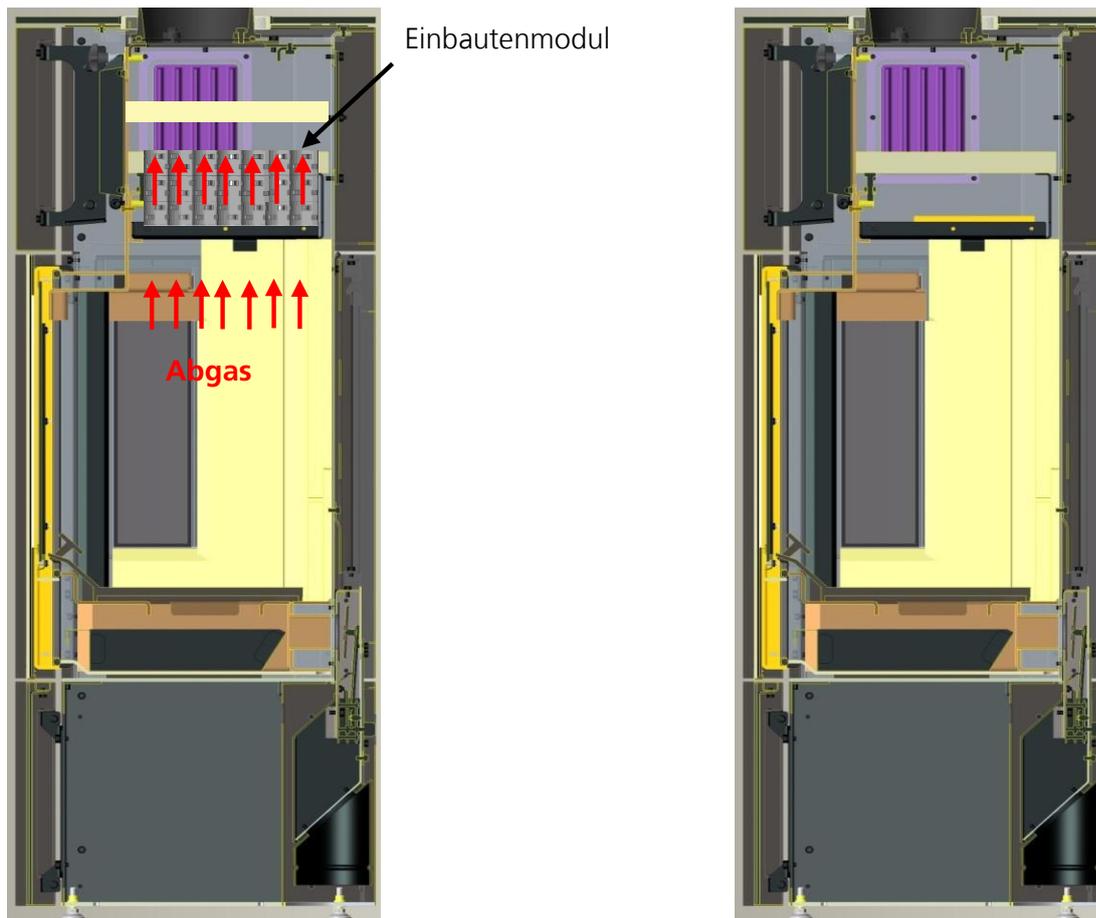


Abbildung 13: Verwendete Einzelraumfeuerungsanlage gemäß DIN EN 13240, Prototyp eines freistehenden Raumheizers der Firma Wodtke GmbH.

Die Messung und der Betrieb des Raumheizers erfolgten nach DIN EN 13240. Diese Prüfnorm beschreibt die Anforderungen an die Auslegung, Herstellung, Ausführung, Sicherheit, Leistungsvermögen, Betriebsanweisung und die Kennzeichnung von Raumheizern während des Betriebs mit festen Brennstoffen. Außerdem umfasst die Norm Vorgaben über den Ablauf der Emissionsmessung von Raumheizern. Gemäß DIN EN 13240 ist nach einer Vorprüfung der folgende Prüfablauf einzuhalten. Die Prüfabläufe sind in den Prüfnormen aus Gründen der Repräsentativität bzw. der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse festgelegt und müssen während der Prüfung entsprechend eingehalten werden:

- Vor der Prüfung muss die Feuerungsanlage die erforderlichen Betriebstemperaturen erreichen, die für einen stabilen und repräsentativen Betrieb notwendig sind.
- Die Feuerungsanlage wird mit neuem Brennstoff beschickt, sobald der vorherige Abbrand keine sichtbare Flamme mehr aufweist (ca. 4 Vol. % CO₂) und die Brennstoffmasse fast vollständig umgesetzt wurde. Nach dem Schließen der Feuerraumtür wird der Prüfabbrand gestartet.
- Beim Betrieb soll ein Abgasförderdruck von 12 Pascal ± 2 Pascal eingehalten werden.
- Die Messung gasförmiger Bestandteile im Abgas erfolgt kontinuierlich über die gesamte Abbranddauer. Die gravimetrische Messung der Staubkonzentrationen erfolgt diskontinuierlich. Sie beginnt spätestens drei Minuten nach jeder Neubeschickung und dauert 30 Minuten.
- Die gemäß der 1. BImSchV geforderten Emissionsgrenzwerte und Wirkungsgrade müssen in drei separaten Prüfabbränden eingehalten werden (Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß DIN EN 13229 müssen lediglich zwei separate Prüfabbrände im Mittel bestehen).
- Während der Emissionsmessung dürfen keine Veränderungen an der Feuerungsanlage oder den Lufteinstellungen vorgenommen werden.
- Es ist eine Mindestabbranddauer von 45 Minuten bzw. das von den Herstellern empfohlene Beschickungsregime einzuhalten.

Seit dem 01.01.2015 müssen Raumheizer mit Flachfeuerung, entsprechend der in diesem Forschungsprojekt untersuchten Feuerungsanlage, Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid in Höhe von 1.250 mg/Vm³, Staubkonzentrationen in Höhe von 40 mg/Vm³ und einen Mindestwirkungsgrad von 73 % erreichen. Für Kamineinsätze nach DIN EN 13229 gelten gleiche Emissionsgrenzwerte. Allerdings muss der Wirkungsgrad für Kamineinsätze mindestens 75 % betragen (Tabelle 1).

5.2.2 Versuchsverbrennungsanlagen mit einer langsamen Wärmeabgabe im Aufstellraum, Speicherfeuerstätte nach DIN EN 15250

Als Versuchsverbrennungsanlage zur Untersuchung der Einbautentechnik in Einzelraumfeuerungsanlagen mit einer langsamen Wärmeabgabe wurde ein Prototyp einer Speicherfeuerstätte der Firma Rondo-Ringkachelofen GmbH eingesetzt (Abbildung 14).

Dieser Prototyp wurde für eine thermische Wärmeleistung im Speicherbetrieb von 1,5 kW bis 2,5 kW ausgelegt. Für den Betrieb dieser Speicherfeuerstätte wird naturbelassenes Holz (Holzscheite mit einer maximalen Länge von 25 cm) vom Hersteller empfohlen. Die Anlage besitzt eine zylindrische Form mit einem Modulaufsatz aus ringförmigem Stahl. Der Feuerraum ist mit einem feuerfesten Beton ausgekleidet. An der Vorderseite der Feuerstätte befindet sich eine Glastür mit einem Sichtfenster. Die Verbrennungsluftzufuhr erfolgt ausschließlich über die Scheibenspülluft. Nach der Verbrennungskammer strömt das Abgas in die Nachbrennkammer, in der die heißen Abgase von

Speichermodulen umgeben sind. Das Volumen der Nachbrennkammer beträgt ca. 12 Liter. Als Speichermaterial wurde ein spezieller Beton verwendet, der von der Firma Rondo-Ringkachelofen entwickelt wurde.

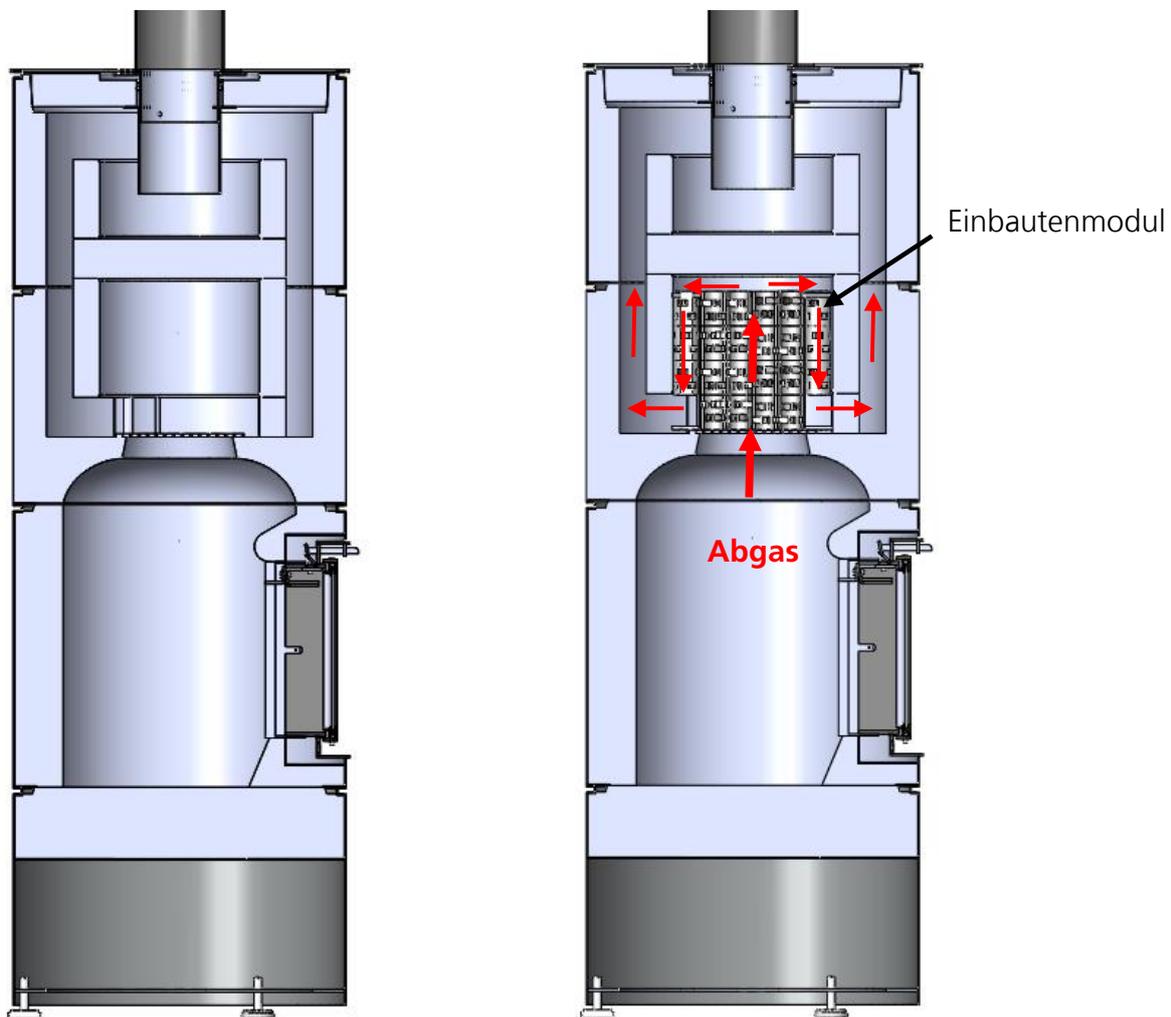


Abbildung 14: Verwendete Einzelraumfeuerungsanlage gemäß DIN EN 15250, Prototyp einer Speicherfeuerstätte der Firma Rondo Kachelofen GmbH.

Die Messung und der Betrieb der Speicherfeuerstätte erfolgen nach DIN EN 15250. Diese Prüfnorm beschreibt die Anforderungen an die Auslegung, Herstellung, Ausführung, Sicherheit, Leistungsvermögen, Anleitung und die Kennzeichnung von Speicherfeuerstätten während des Betriebs mit festen Brennstoffen. Darüber hinaus beinhaltet die Norm Vorgaben über den Ablauf der Emissionsmessung von Speicherfeuerstätten. Gemäß DIN EN 15250 ist für eine hohe Repräsentativität und Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse der folgender Prüfablauf einzuhalten.

- Bei der Messung darf die Feuerungsanlage nur mit bestimmten Brennstoffmassen beschickt werden, die vom Hersteller gemäß der ausgelegten thermischen Wärmeleistung festgelegt werden. Die Festlegung der Brennstoffmassen hängen von der gesamten

Wärmespeicherkapazität der Speichersteine bzw. -masse ab. Wird die Speicherfeuerstätte mit einer zu großen Brennstoffmasse beschickt, ist mit massiven Wärmeverlusten durch das Abgas bzw. Verschlechterungen des Feuerungswirkungsgrads zu rechnen.

- Es ist das vom Hersteller empfohlene Beschickungsregime einzuhalten. Es gibt es keine Anforderungen an die Mindestabbranddauer gemäß der Prüfnorm DIN EN 15250.
- Ein Förderdruck von 12 Pascal \pm 2 Pascal soll während des Betriebs eingehalten werden, solange keine anderen Herstellerangaben erforderlich sind, welche in diesem Fall in der Aufstellanleitung für die Feuerstätte angegeben werden müssen.
- Während der Emissionsmessung dürfen keine Veränderungen an der Feuerungsanlage oder den Lufteinstellungen vorgenommen werden.
- Eine Abbrandperiode gilt als beendet, wenn am Ende des Verbrennungsvorgangs entweder 4 % CO₂ oder 25 % des vorangegangenen CO₂-Peaks erreicht wurden (es gilt der jeweils niedrigere Wert).
- Die Emissionsmessung startet unmittelbar nach der ersten Brennstoffcharge, die maximal 30 % der gesamten Brennstoffmenge ausmachen darf. Weitere Parameter wie z. B. die Feuerungsleistung oder der Wirkungsgrad werden von Beginn der Messung mit erfasst bzw. berechnet. Hier muss darauf geachtet werden, dass eine Teilladung (Brennstoffcharge) mindestens 20 % der gesamten Brennstoffaufgabe betragen muss. Die Messung gasförmiger Bestandteile im Abgas erfolgt kontinuierlich über die gesamte Abbranddauer. Die gravimetrische Messung der Staubkonzentrationen erfolgt diskontinuierlich. Sie beginnt spätestens drei Minuten nach jeder Neubeschickung und dauert 30 Minuten.
- Nach dem letzten Abbrand soll die Verbrennungsluftzufuhr geschlossen werden, sodass die erzeugte Energie in der Speicherfeuerstätte verbleibt bzw. in den Aufstellraum abgestrahlt wird und nicht über den Abgasstrom verloren geht.

Seit dem 01.01.2015 müssen Speichereinzelfeuerstätten Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid von 1.250 mg/Vm³, Staubkonzentrationen in von 40 mg/Vm³ einhalten sowie einen Mindestwirkungsgrad von 75 % erreichen (Tabelle 1).

6 Experimentelle Untersuchungen zur Einbautentechnik

Die im Abschnitt 5.2 vorgestellten Verbrennungsversuchsanlagen bzw. Prototypen der Einzelraumfeuerungsanlagen wurden vor dem Beginn der Hauptuntersuchungen technisch und betrieblich optimiert. Während der Optimierungsarbeiten wurden folgende Änderungen an den Prototypen vorgenommen:

- Ermittlung der optimalen Einstellungen der Verbrennungsluftzufuhr (Primär-, Sekundärluft- und Tertiärluft), bei der ein möglichst guter und reproduzierbarer Betrieb sowie eine emissionsarme Verbrennung erreicht werden können.
- Festlegung des optimalen Beschickungsregimes (Brennstoffmasse pro Auflage, Länge, Form und Anzahl der Scheite, Anordnung der Scheite im Feuerraum bei der Beschickung), unter Berücksichtigung der thermischen Leistung, bei dem sowohl eine stabile und möglichst vollständige als auch effiziente Verbrennung gewährleistet wird.

Zur Bewertung der Einbautentechnik wurden die Prototypen mit und ohne Einbautentechnik betrieben. Bei dem Betrieb der Prototypen ohne Einbauten wurden keine Variationen der Betriebsparameter vorgenommen, welche die Verbrennungsqualität hinsichtlich der Emissionen sowie der Effizienz beeinflussen. Abweichungen zu den optimierten Betriebseinstellungen (Verbrennungslufteinstellung und Beschickungsregime) haben zu einer deutlichen Verschlechterung der Verbrennungsqualität geführt. Daher waren die Änderungen der Betriebsparameter in diesem Betriebsfall (ohne Einbautentechnik) nicht zielführend. Beim Betrieb der Prototypen mit der Einbautentechnik wurden hingegen unterschiedliche Einstellungen der Betriebsparameter vorgenommen, um die Flexibilität der Einbautentechnik im Praxisbetrieb zu testen und zu bewerten. Die Bewertung der Einbautentechnik hinsichtlich Änderungen der Betriebsparameter, erfolgte bezüglich des optimierten Betriebs der Prototypen bzw. Versuchsverbrennungsanlagen, mit denen die besten Versuchsergebnisse ohne Einbautentechnik erzielt worden sind.

Die Flexibilitätsprüfung der Einbautentechnik im Praxisbetrieb bildet den Kern dieser Arbeit bzw. der Hauptuntersuchung, bei der die für die Verbrennung relevanten Parameter variiert wurden. Im täglichen Praxisbetrieb werden Einzelraumfeuerungsanlagen meistens nicht nach den vom Hersteller empfohlenen Betriebseinstellungen (Brennstoffmasse, Art der Beschickung, Förderdruck, Brennstoffart usw.) betrieben. Aus diesem Grund soll die Entwicklung von integrierten Technologien, wie beispielsweise die Einbautentechnik, die einen stabilen Betrieb und eine effiziente schadstoffarme Verbrennung unabhängig von vielen Betriebsfaktoren gewährleisten soll, zu positiven ökonomischen und ökologischen Effekten führen.

Zu einer zielführenden Entwicklung und Untersuchung der Einbautentechnik hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit und Praxistauglichkeit wurden

Änderungen an dem Abgasförderdruck, dem Beschickungsregime und der Brennstoffart vorgenommen.

Durch die Variierung des Förderdrucks ändern sich die Strömungsverhältnisse sowie die gesamte zugeführte Verbrennungsluftmenge und folglich die Verweilzeit der Abgase in der aktiven Reaktionszone. Durch die Änderung des Förderdrucks lassen sich beim Betrieb der Einzelraumfeuerungsanlagen die Variationen der Verbrennungslufteinstellungen simulieren und somit betrachten. Der Einfluss des Förderdrucks auf den Betrieb von Einzelraumfeuerungsanlagen ist ausführlich im Abschnitt 3.3.2 geschildert. Bei einer Änderung der Masse, Form und Anzahl der Holzscheite wird zusätzlich zur thermischen Leistung die Dauer des Verbrennungsvorgangs aufgrund der Änderung der aktiven Brennstoffoberfläche beeinflusst. Hier gilt, je größer die Oberfläche des Brennstoffs, desto intensiver verläuft der Vergasungsprozess und desto kürzer ist der Verbrennungsvorgang. Bei intensiver Vergasung ändert sich das Verhältnis von Brenngas zu Sauerstoff, wodurch die Verbrennungsqualität direkt beeinflusst wird. Der Brennstoff spielt durch seine physikalischen, chemischen und verbrennungstechnischen Eigenschaften eine ausschlaggebende Rolle für die Verbrennungsqualität. Hier ist zwischen Hart- (Buchenholz) und Weichhölzern (Fichtenholz) zu unterscheiden. Diese beiden Holzarten wurden im Rahmen dieses Projekts beim Einsatz der Einbautentechnik untersucht.

Zur Bewertung der Einbautentechnik sowie des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens während des Betriebs, mit den oben aufgelisteten Variationen, wurden der Druckverlust, das Temperaturverhalten und die staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen gemessen bzw. ermittelt.

Der Druckverlust während des Betriebs ist für den Einsatz der Einbautentechnik in Einzelraumfeuerungsanlagen eine wichtige und sicherheitsrelevante Größe. Erfolgt die Erhöhung des Druckverlustes z. B. durch eine Verblockung der Abgaswege schnell und unkontrolliert, ist nicht nur mit einer hohen Umweltbelastung, sondern auch mit einer Gefährdung des Nutzers durch das Austreten gefährlicher Abgase in den Aufstellraum zu rechnen. Beim Einsatz von integrierten Technologien sollte es weder kurz- noch langfristig zu einem Anstieg des Druckverlusts kommen. Bei dem Temperaturverhalten wird die Entwicklung der Temperaturen des Einbautenmoduls sowie des Abgases während des Betriebs berücksichtigt. Der Verlauf der Temperatur im Einbautenmodul ist eine wichtige Größe zur Beurteilung der Reduktions- und Abscheideleistung sowie des Selbstreinigungsprozesses. Steigt die Temperatur im Einbautenmodul auf über 500 °C an, wird die thermische Oxidation nicht verbrannter Bestandteile im Abgas begünstigt. Gleichzeitig können nicht verbrannte, adhäsierende bzw. an den Einbauten anhaftende Stäube und Kondensate thermisch zersetzt und somit behandelt werden. Das Abgastemperaturverhalten beschreibt den Verlauf der Abgastemperatur während des Betriebs. Bei einer Erhöhung der Abgastemperatur nehmen die Energieverluste über den Abgasweg zu. Folglich nimmt die Effizienz der Einzelraumfeuerungsanlage ab. Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, zu ermitteln, in wieweit während des Betriebs ausreichende Temperaturen

im Einbautenmodul für die Oxidation und Selbstreinigung der Einbautentechnik bereitgestellt werden können. Staubförmige Emissionen können hinsichtlich ihrer messtechnischen Erfassbarkeit in zwei Größenfraktionen geteilt werden. Es ist zwischen Stäuben mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als $1\ \mu\text{m}$ und größer als $1\ \mu\text{m}$ zu unterscheiden. Die Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser größer als $1\ \mu\text{m}$ werden nach dem gravimetrischen Messprinzip ermittelt. Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als $1\ \mu\text{m}$ werden über ein Staubzählverfahren erfasst. Das verwendete Staubzählverfahren wird in Absatz 5.1.3 ausführlich erläutert. Gemäß den gesetzlichen Anforderungen (regional, deutschland- und europaweit) wurden zur Bewertung der Einbautentechnik bezüglich einer Minderung gefährlicher Schadstoffemissionen Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide gemessen. Durch den Einsatz der Einbautentechnik sollen Stäube, Kohlenstoffmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Abgas gemindert werden. Stickstoffoxide im Abgas aus mit scheitholzbetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen sind durch geringe Verbrennungstemperaturen und einen geringen Stickstoffanteil in naturbelassenen Hölzern unproblematisch. Durch den Einsatz der Einbauten sollte es nicht zu einem Anstieg der Stickstoffoxidemissionen kommen.

6.1 Experimentelle Untersuchungen des Raumheizers gemäß DIN EN 13240 mit und ohne Einbauten

Nach der technischen Optimierung des Raumheizer-Prototyps wurden die optimalen Einstellungen der Verbrennungsluftzufuhr (Rostluft: 100 % geschlossen, Scheibenspülluft mit der Sekundärluft: 60 % geöffnet) sowie ein günstiges Beschickungsregime (drei Scheite mit einer Länge von 20 cm und einer Masse von 1,8 kg) bei einem Abgasförderdruck vom 12 Pascal bestimmt, mit denen ein möglichst sachgemäßer (stabil, effizient und emissionsarm) Betrieb ohne Einbautentechnik erreicht wird. Bei den Messungen ohne Einbautentechnik wurde festgestellt, dass der Prototyp außerhalb dieser Einstellungen keinen sachgemäßen Betrieb gewährleisten kann. Daher wurden zahlreiche Versuche mit diversen Einstellungen beim Betrieb ohne Einbauten durchgeführt, welche im Rahmen dieses Berichts nicht dargestellt werden. Die Betriebsverbesserung hinsichtlich der Emissionsminderung und Effizienzerhöhung des Raumheizer-Prototyps durch die Integration der Einbautentechnik bezieht sich ausschließlich auf den Betrieb ohne Einbautentechnik, bei den oben erwähnten optimalen Einstellungen.

6.1.1 Versuchsplanung, Raumheizer gemäß DIN EN 13240

Die Tabelle 9 zeigt das Versuchsprogramm zur Untersuchung der Einbautentechnik. Dabei ist zwischen Untersuchungen ohne Einbautentechnik sowie mit Einbautentechnik beim Einsatz von metallischen und keramischen Einbauten zu unterscheiden. Ohne Einbauten wurde der Raumheizer mit Buchen- sowie Fichtenholz nur unter optimalen Betriebseinstellungen betrieben. Die Variationen des Abgasförderdrucks und des

Beschickungsregimes wurden lediglich beim Betrieb mit Einbauten durchgeführt.

Tabelle 9: Versuchsprogramm mit und ohne zusätzliche Einbauten mit dem freistehenden Raumheizer.

Versuchsprogramm mit Einzelraumfeuerungsanlagen						
Feuerstätte	Einsatz der Feuerstätte	Variation	Anzahl der Scheite	Druck [Pa]	Brennstoff	Masse [kg]
freistehender Raumheizer nach DIN EN 13240	ohne Einbauten ⁽¹⁾	Optimale Einstellungen ⁽²⁾	3	12	Buche	1,8
			3	12	Fichte	1,8
	metallische Einbauten	Optimale Einstellungen ⁽²⁾	4	12	Buche	1,8
			Förderdruck	3	16	Buche
		Masse		3	8	Buche
			3	12	Buche	2,2
			3	12	Buche	1,4
		Scheitenanzahl	4	12	Buche	1,8
		Brennstoff	3	12	Fichte	1,8
	keramische Einbauten	Optimale Einstellungen ⁽²⁾	3	12	Buche	1,8
			Förderdruck	3	16	Buche
		Brennstoff-masse		3	8	Buche
			3	12	Buche	2,2
			3	12	Buche	1,4
		Scheitenanzahl	4	12	Buche	1,8
	Brennstoff	3	12	Fichte	1,8	

- (1): als Vergleichsreferenz, die Betriebsverbesserung hinsichtlich der Emissionsminderung und Effizienzerhöhung des Raumheizer-Prototyps durch die Integrierung der Einbautentechnik bezieht sich nur auf den Betrieb ohne Einbautentechnik bei den optimalen oben in der Tabelle 9 erwähnten Einstellungen.
- (2): Optimale Einstellungen: Verbrennungsluftzufuhr (Rostluft: 100 %geschlossen, Sekundär- mit der Scheibenspülluft 60 % geöffnet), Beschickungsregime (drei Scheite mit einer Länge von 20 cm und einer Masse von 1,8 kg), Förderdruck: 12 Pascal.

6.1.2 Untersuchungsergebnisse des Raumheizers gemäß DIN EN 13240

Im folgenden Abschnitt werden die Untersuchungsergebnisse mit den in Tabelle 9 dargestellten Versuchsreihen erläutert. Die Messergebnisse in diesem Abschnitt beziehen sich auf die in Abschnitt 6 aufgeführten Parameter zur Bewertung der Einbautentechnik während des Betriebs.

6.1.2.1 Druckverlust beim Betrieb des freistehenden Raumheizers

Der Druckverlust ist eine wichtige Größe zur Bewertung von Abscheidesystemen bzw. von integrierten Technologien wie der Einbautentechnik. Während des Betriebs kann es besonders beim Auftreten von ungünstigen Betriebszuständen zu höheren Staubbelastungen kommen, durch die die Abgaswege zugesetzt werden. Dabei erhöht sich der

Druckverlust über die Betriebsdauer der Feuerungsanlage und die Gefahr des Austretens von Schadgasen aus dem Feuerraum steigt. Ziel dieser Untersuchung ist es, beim Einsatz der Einbautentechnik einen möglichst geringen und über den Betrieb konstanten Druckverlust zu erzielen, sodass ein zuverlässiger und sicherer Anlagenbetrieb gewährleistet werden kann. Im Diagramm 7 und Diagramm 8 sind die Verläufe des Druckverlusts während des Betriebs des Raumheizers mit keramischen und metallischen Einbauten über mehrere Betriebstage dargestellt.

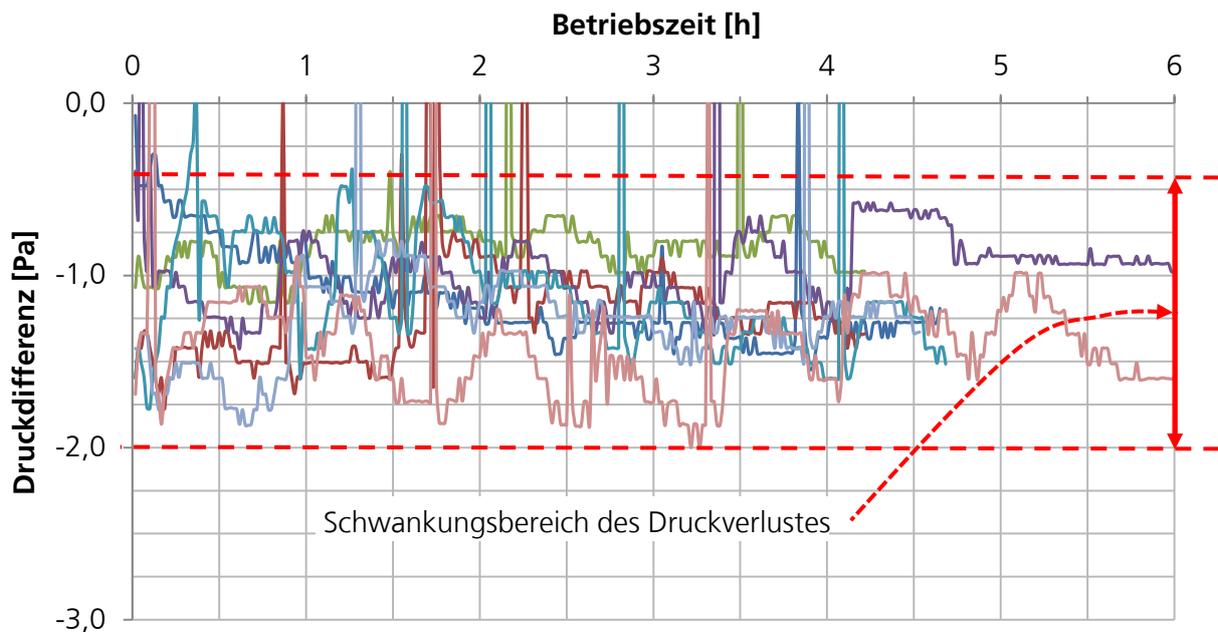


Diagramm 7: Druckverlust über mehrere Betriebstage mit keramischen Einbauten.

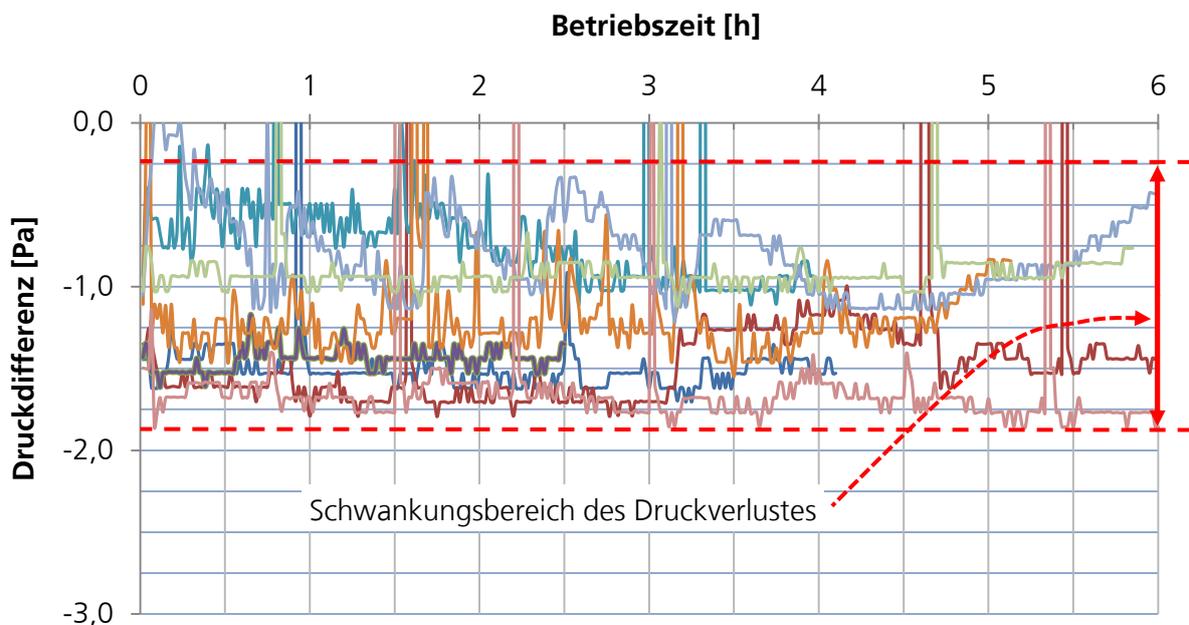


Diagramm 8: Druckverlust über mehrere Betriebstage mit metallischen Einbauten.

Den Diagrammen ist zu entnehmen, dass der Druckverlust mit beiden Einbauten zwischen 0,3 und 2,0 Pascal liegt und sich während des Betriebs konstant verhält bzw. über die Versuchstage keinen Anstieg erfährt. Dieser konstante und niedrige Druckverlust ist auf den geringen Strömungswiderstand in den Einbauten dank der günstigen Architektur bzw. deterministischen Struktur des Einbautenmoduls zurückzuführen.

Es ist zu erwähnen, dass die in Diagramm 7 und Diagramm 8 dargestellten Druckverluste nicht nur durch die Einbauten sondern durch die gesamte Abgasstrecke zwischen Feuerraum und dem Verbindungsstück der Abgasanlage verursacht werden. Der Beitrag des Einbautenmoduls am gesamten Druckverlust beträgt zwischen 20 % und 30 %.

Eine Verblockung der Abgaswege oder ein unkontrollierter Anstieg des Druckverlusts wurde über 600 Betriebsstunden ohne jegliche Reinigung nicht festgestellt. Während der Versuchstage wurden weder Reinigungs- noch Wartungsarbeiten an den Einbauten durchgeführt. Der Einfluss der Einbautentechnik auf den Druckverlust ist auch im Dauerbetrieb in der Praxis vernachlässigbar. Dank des positiven Druckverlustverhaltens wird der Einsatz der Einbautentechnik mit Sicherheit zu keiner Gefährdung der Nutzer durch das Austreten von Abgasen in den Aufstellraum führen.

6.1.2.2 Temperaturverhalten beim Betrieb des freistehenden Raumheizers

Beim Temperaturverhalten wird die Entwicklung der Temperaturen des Einbautenmoduls sowie des Abgases während des Betriebs berücksichtigt. Das Verhalten der Abgastemperatur beschreibt den Verlauf der Abgastemperatur über den Chargenabbrand. Hohe Abgastemperaturen sind ein Zeichen für hohe thermische Energieverluste. Durch den Einsatz der Einbautentechnik sollen ein stabiler Temperaturverlauf sowie niedrige Abgastemperaturen erzielt werden, mit denen hohe Feuerungswirkungsgrade erreicht werden können.

Anders als bei der Abgastemperatur, müssen die Temperaturen im Einbautenmodul zur Entfaltung einer positiven Oxidationswirkung möglichst hoch und homogen sein. Dadurch soll nicht nur die thermische Behandlung der staub- und gasförmigen Emissionen erreicht, sondern auch eine Selbstregenerierung gewährleistet werden.

Abgastemperaturen beim Betrieb des freistehenden Raumheizers

Die Untersuchung des Abgastemperaturverhaltens ist wichtig, um die Wirkung der Einbautenmodule hinsichtlich einer Effizienzsteigerung zu quantifizieren bzw. über lange Betriebszeit zu bewerten. Hohe Abgastemperaturen sind ein Indiz für niedrige Wirkungsgrade, da über den Abgasweg verlorene Wärme sowohl in der Anlage (zur Oxidation nicht verbrannter Bestandteile), als auch im Aufstellraum (zur Unterstützung der Behaglichkeit) nicht mehr zur Verfügung steht. Durch den Einsatz der Einbautenmodule sollen hohe Temperaturspitzen und Temperaturschwankungen vermieden werden. Außerdem soll durch den Einsatz der

Einbautentechnik dafür gesorgt werden, dass die Abgastemperaturen über den zeitlichen Verlauf nicht ansteigen.

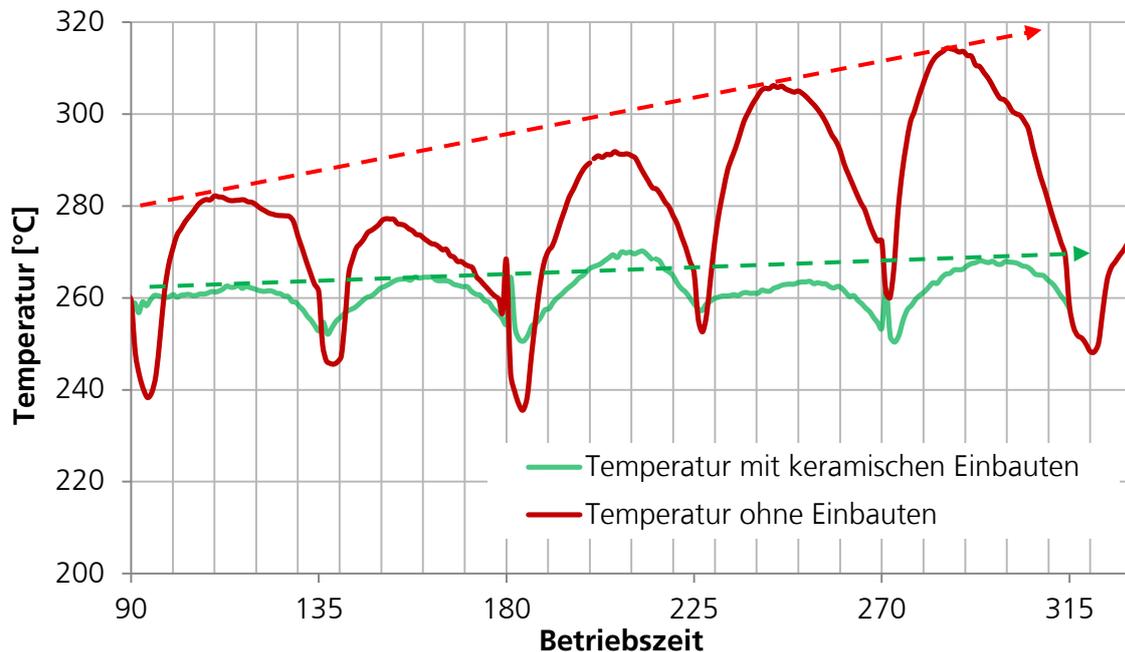


Diagramm 9: Temperaturverlauf ohne und mit keramischen Einbauten beim Betrieb des freistehenden Raumheizers.

Im Diagramm 9 sind die Verläufe der Abgastemperaturen während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit keramischen Einbauten nach dem Anheizen bzw. ab der dritten Beschickung dargestellt. Im Diagramm 9 ist ersichtlich, dass die Abgastemperatur während des Betriebs ohne Einbautentechnik über die Betriebszeit zunimmt. Der Temperaturanstieg wird anhand einer Trendkurve zwischen der ersten und der letzten Auflage verdeutlicht. Dabei steigen die Spitzentemperaturen von etwa 280 °C auf über 315 °C an. Es ist außerdem zu sehen, dass der Verlauf der Abgastemperaturen durch den Einsatz der Einbautentechnik stabilisiert wird bzw. über den Betrieb nur einen vernachlässigbar geringen Anstieg (< 5 °C) der Temperaturspitzen erfährt.

Durch den Einsatz der Einbautenmodule wurden die Schwankungen der Abgastemperaturen reduziert. Bei den Versuchen ohne keramische Einbauten schwanken die Abgastemperaturen um eine Differenz von etwa 40 °C bis 55 °C. Mit den Einbauten wurden die Schwankungen auf 10 °C bis 15 °C reduziert. Dieser Effekt beruht auf der intensiven Wärmespeicherung der Einbauten. In den Start- und Ausbrandphasen geben die Einbautenmodule ihre gespeicherte Wärme an den Abgasstrom ab, sodass die Temperatur keinen starken Abfall erfährt. In Phasen der intensiven Verbrennung speichern die Einbauten einen Teil der während der Verbrennung frei werdenden Energie. Dadurch können die Temperaturschwankungen auf unter 20 °C reduziert werden.

Durch den mit den Einbauten generierten Wechsel aus Speicherung und Strahlung von thermischer Energie können die Abgastemperaturen auf einem stabilen und niedrigen Temperaturniveau gehalten werden.

Temperatur im Einbautenmodul

Das Temperaturverhalten lässt sich durch den Temperaturverlauf im Einbautenmodul in unterschiedlichen Ebenen beschreiben. Anhand dieses Verlaufs können die Effektivität der Wärmespeicher-, Oxidations- und Reinigungswirkung des Einbautenmoduls festgestellt werden. Im Zuge der Wärmespeicherung steigt die Temperatur im Einbautenmodul an. Dabei wird die Energie aus dem Abgasstrom entzogen. Durch den Wärmespeichervorgang müssen in den Einbauten Temperaturen oberhalb von 500 °C erreicht werden, um die abgeschiedenen brennbaren Bestandteile verbrennen zu können. Im Diagramm 10 sind die Temperaturverläufe eines dreistufigen Einbautenmoduls (Unterseite - in Richtung des Feuerraums zeigend, Modulmitte und Oberseite - in Richtung Abgasanlage zeigend) mit der nötigen Mindesttemperatur zur vollständigen Oxidation dargestellt.

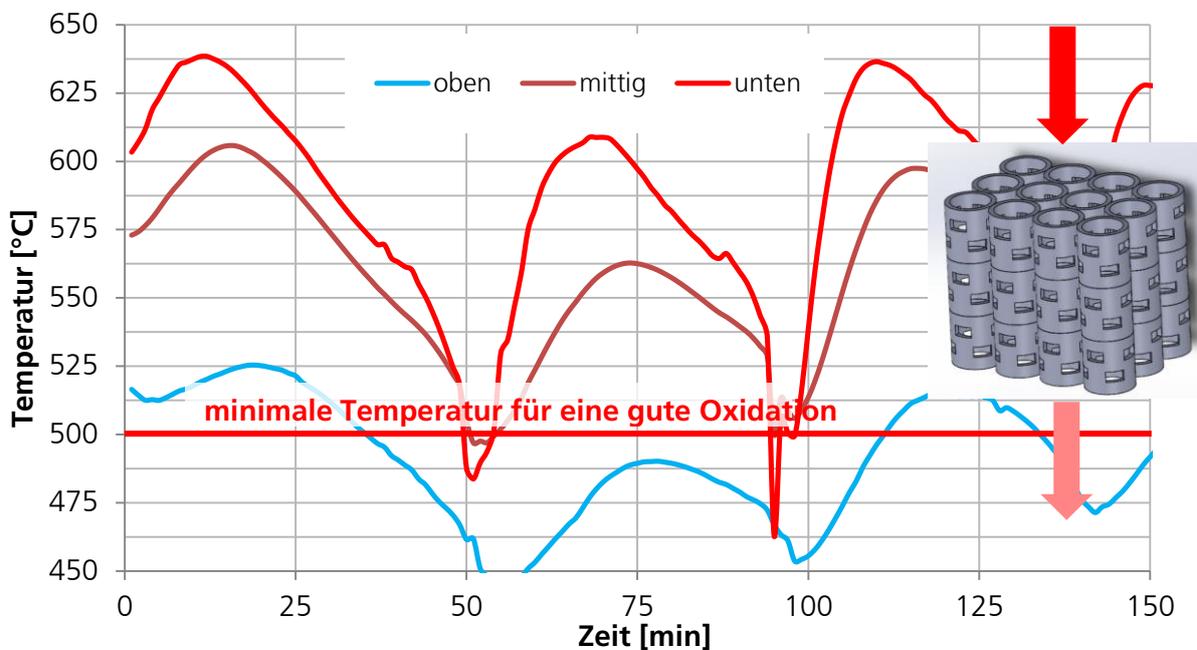


Diagramm 10: Temperaturverlauf im Einbautenmodul (dreistufig, keramische Einbauten).

Das Diagramm verdeutlicht, dass die Temperaturen im Einbautenmodul im Gegensatz zu den Abgastemperaturen über den Betrieb starke Schwankungen aufweisen. An der Unterseite des Moduls schwanken die Temperaturen zwischen ca. 460 °C und 640 °C. In der Mitte des Moduls schwanken die Temperaturen zwischen 500 °C und 610 °C. Dieser Verlauf lässt sich auf den Wärmespeichereffekt und die Wärmestrahlungswirkung der Einbauten während des Betriebs zurückführen. Im Zuge der thermischen Oxidation des Brennstoffs steigen die Temperaturen im Feuerraum, im Abgas und im Einbautenmodul an. Die dabei gespeicherte Energie soll während der Ausbrandphase einen starken Temperaturabfall in der aktiven Reaktionszone

vor allem im Einbautenmodul vermeiden. Im Diagramm ist außerdem zu entnehmen, dass die Temperatur auf der Moduloberseite meistens unterhalb des thermischen Oxidationsbereichs liegt und die Oxidationswirkung dieser Stufe deshalb vernachlässigbar ist. Aus diesem Grund wurde in den folgenden Untersuchungen das dreistufige Modul durch ein zweistufiges Modul ersetzt. Diagramm 11 zeigt die Temperaturverläufe im zweistufigen Modul aus keramischen Einbauten.

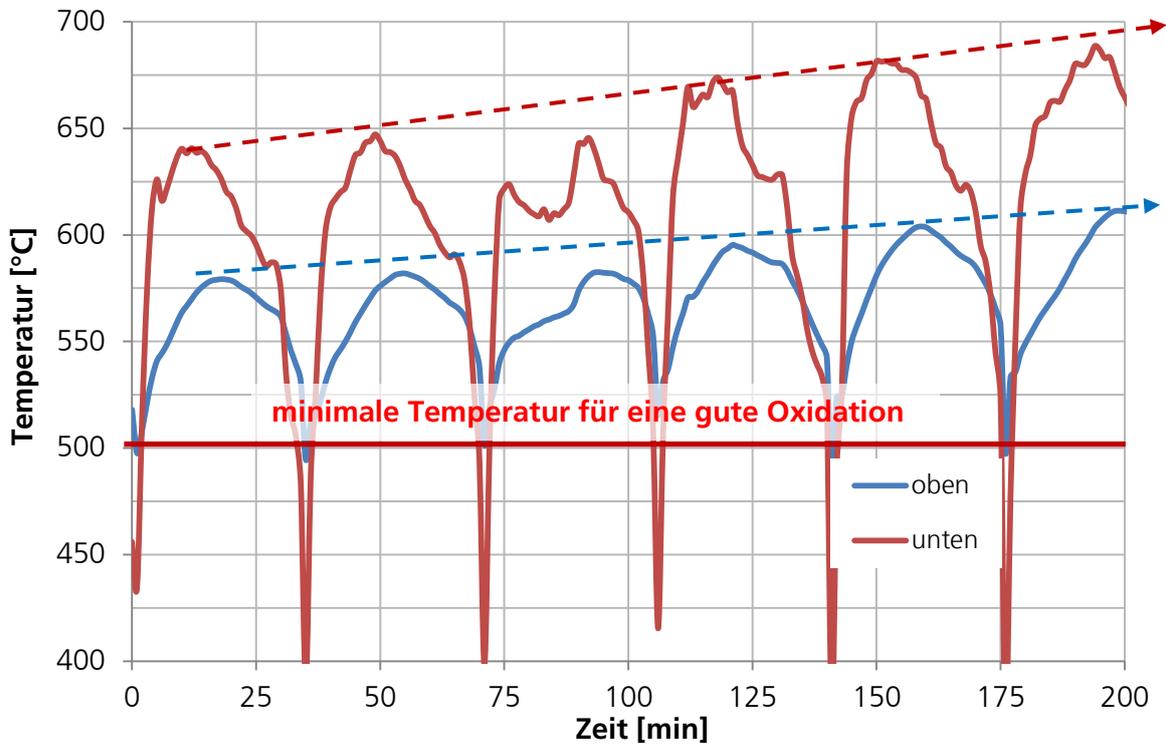


Diagramm 11: Temperaturverlauf im Einbautenmodul (zweistufig, keramische Einbauten).

In Diagramm 11 sind die Temperaturverläufe in einem zweistufigen Einbautenmodul (unten – in Richtung zum Feuerraum zeigend, oben – in Richtung zur Abgasanlage zeigend) dargestellt. Ähnlich wie bei dem Verlauf mit einem dreistufigen Modul sind die Temperaturschwankungen durch die Wechselwirkung zwischen Wärmespeicherung und Wärmestrahlung während des Betriebs stark schwankend. In Diagramm 11 ist außerdem zu sehen, dass die Temperatur auf der Unterseite des Moduls während des Betriebs zunimmt. Zu Beginn dieser Versuchsreihe liegt der Spitzenwert der Modultemperatur bei etwa 630 °C. Während der letzten Auflage steigt die Temperatur auf circa 690 °C an. Auf der Moduloberseite ist der Temperaturanstieg geringer. Hier steigt die Temperatur von etwa 580 °C auf 630 °C an. Die Temperaturdifferenz zwischen der unteren und oberen Modulstufe liefert direkte Aufschlüsse über die im Einbautenmodul gespeicherte Wärme, welche während des Betriebs der Oxidation zur Verfügung gestellt werden kann.

6.1.2.3 Gasförmige Emissionen

Gemäß der 1. BImSchV darf in dem Abgas eines mit Feststoffen betriebenen freistehenden Raumheizers, während einer Typprüfung, für Kohlenstoffmonoxid ein Grenzwert in Höhe von maximal 1.250 mg/Nm^3 nicht überschritten werden. In einigen regionalen Brennstoffverordnungen Deutschlands und gemäß den gesetzlichen Vorgaben anderer europäischer Länder wird die Einhaltung zusätzlicher Grenzwerte z. B. für Kohlenwasserstoffe oder Stickstoffoxide gefordert. Eine genaue Auflistung über die gesetzlichen Emissionsanforderungen ist in Abschnitt 3.1 dargestellt.

Kohlenstoffmonoxid ist eine chemische Verbindung, die aus einem Kohlenstoff- und einem Sauerstoffatom besteht und bei einer unvollständigen Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe gebildet werden kann. Es birgt ein hohes Gefährdungspotential, da es vom Menschen sinnlich nicht wahrgenommen werden kann und abhängig von der Konzentration und dem Belastungszeitraum zu gesundheitlichen Beschwerden bis hin zur tödlichen Intoxikation führen kann.

Der Sammelbegriff Kohlenwasserstoffe beschreibt eine Gruppe chemischer Verbindungen, die ausschließlich aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen und in mehrere Untergruppen unterteilt werden können. Dazu zählen z. B. Alkene, Alkane oder Aromate. Sie machen den Hauptteil der flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) aus. Die von den Kohlenwasserstoffen ausgehende toxikologische Wirkung ist sehr unterschiedlich. Sie reicht von Einflüssen auf Blutzellen, Augen- und Nasenreizungen bis hin zu Atemlähmungen und kanzerogenen Wirkungen.

Stickstoffoxide im Abgas von biomassebetriebenen Feuerungsanlagen bestehen zu etwa zu 95 Vol.-% aus Stickstoffmonoxid (NO) und etwa 5 Vol.-% aus Stickstoffdioxid (NO₂). Durch die relativ geringen Verbrennungstemperaturen im Feuerraum von Einzelraumfeuerungsanlagen entstehen Stickstoffoxide fast ausschließlich aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff. Stickstoffoxide reizen durch ihre hohe Löslichkeit Schleimhäute und können Atemwegserkrankungen auslösen. Außerdem verursachen sie eine Reihe weiterer negativer Umweltauswirkungen.

Untersuchung zum Kohlenstoffmonoxid/Raumheizer gemäß DIN EN 13240

Gemäß der 1. BImSchV gelten in Deutschland während einer Typprüfung von mit festen Brennstoffen betriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen unter den gasförmigen Emissionen lediglich Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid. Durch den Einsatz der Einbautentechnik soll die thermische Oxidation von Kohlenstoffmonoxid zu Kohlenstoffdioxid unterstützt werden, sodass heutige und zukünftige Grenzwerte nicht nur auf dem Prüfstand sondern auch im Praxisbetrieb eingehalten werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen mit den Einbauten die Emissionen in den Start- und der Ausbrandbetriebsphasen reduziert werden. Diese Reduzierung ergibt sich dadurch, dass in diesen Phasen die Emissionsspitzen reduziert und zeitlich verkürzt werden. Außerdem sollen mit der Einbautentechnik Fluktuationen

während des stationären Betriebs, die beispielsweise durch Schwankungen des Naturzugs oder Änderungen der Verbrennungsluftzufuhr hervorgerufen werden können, vermieden werden.

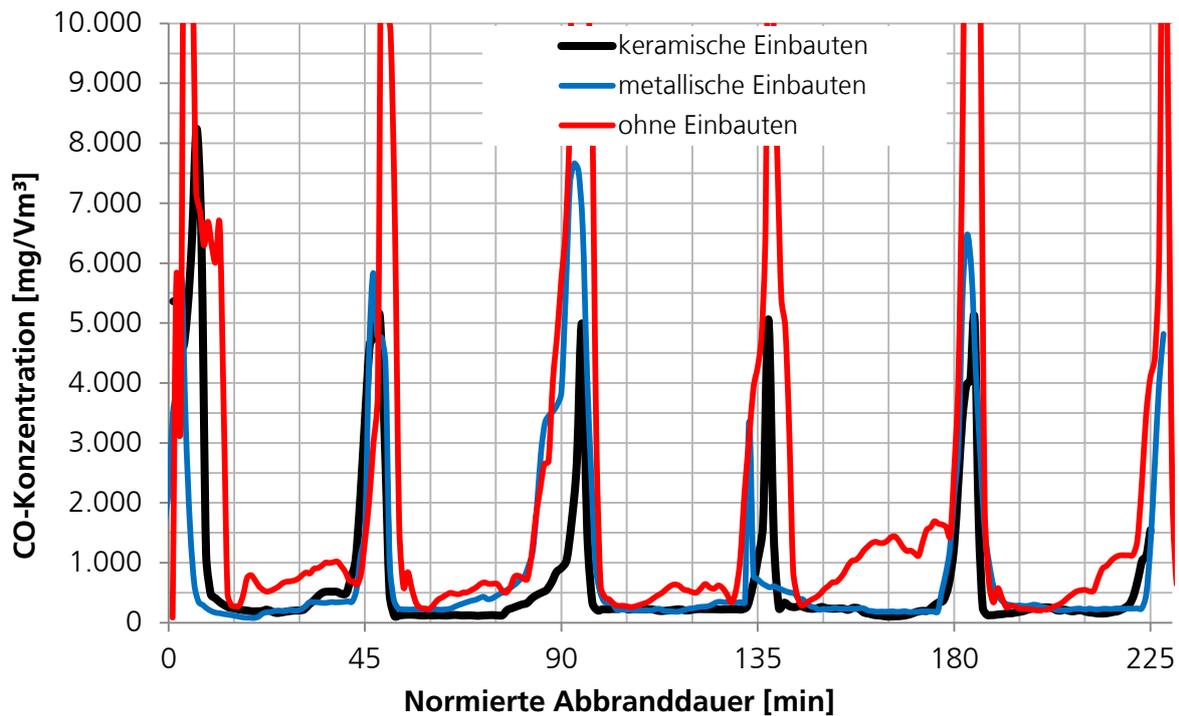


Diagramm 12: Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs ohne und mit metallischen und keramischen Einbauten.

Im Diagramm 12 sind die Verläufe des Kohlenstoffmonoxids ohne und mit keramischen und metallischen Einbauten unter optimalen Prüfbedingungen des freistehenden Raumheizers dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Konzentrationsspitzen in den Start- und Abbrandphasen durch den Einsatz der Einbautentechnik reduziert werden. Während die Konzentrationsspitzen ohne den Einsatz der Einbautenmodule auf über 8.000 mg/Vm³ ansteigen, liegen sie beim Einsatz metallischer Einbauten bei maximal 7.000 mg/Vm³ bzw. mit keramischen Einbauten bei etwa 5.000 mg/Vm³. Den Kurvenverläufen im Diagramm 12 ist außerdem zu entnehmen, dass die Start- und Abbrandphasen mit den Einbauten zeitlich verkürzt werden können. Am deutlichsten wird dieser Effekt beim Einsatz von keramischen Einbauten, mit denen diese Betriebsphase nach etwa 2 Minuten beendet wird. Die Verbesserung dieser Betriebsphasen lässt sich damit begründen, dass genügend Energie in Form von Wärme im Einbautenmodul gespeichert wurde, wodurch die nötige Oxidationstemperatur unabhängig von der Dynamik des Verbrennungsprozesses erreicht und aufrecht erhalten werden kann. Zusätzlich dazu sorgen die in den Einbauten integrierten Turbulatoren für eine bessere Durchmischung des Abgases mit dem enthaltenen Restsauerstoff, sodass die Oxidation nicht verbrannter Bestandteile im Abgas verbessert wird.

Dem Kurvenverlauf ist außerdem zu entnehmen, dass die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid beim Einsatz der Einbautentechnik stabiler verlaufen bzw. nur geringe Fluktuationen entstehen. Dabei schwanken die Konzentrationen über längere Betriebszeit zwischen etwa 150 mg/Vm³ und 250 mg/Vm³. Ohne den Einsatz der Einbautentechnik kommt es bereits während der Verbrennung zu einem starken Anstieg des Kohlenstoffmonoxids auf über 800 mg/Vm³ und zu unkontrollierbaren Schwankungen.

Im Praxisbetrieb werden Einzelraumfeuerungsanlagen meistens nicht nach den von den Herstellern empfohlenen Betriebseinstellungen betrieben. Veränderungen von Betriebsparametern gegenüber den optimalen Einstellungen können das Verbrennungsverhalten über den gesamten Abbrand negativ beeinflussen. Der Vorteil der Einbautentechnik ist die Betriebsflexibilität, wodurch ein besseres, stabileres Verbrennungs- und Emissionsverhalten, unabhängig von der Bedienungsqualität bzw. den Variationen der Betriebsparameter, im Praxisbetrieb erreicht werden kann.

Im Rahmen der Flexibilitätsprüfung wurden während des Betriebs des Raumheizers der Abgasförderdruck, die Brennstoffmasse, die Scheitholzanzahl und die Brennstoffart verändert und auf dieser Basis die Stabilität der Einbautentechnik während des Praxisbetriebs untersucht. In folgenden Kapiteln werden die Untersuchungsergebnisse der Variation des Abgasförderdrucks, der Brennstoffmasse, Scheitenanzahl und der Art des Brennstoffs ausführlich geschildert.

Variation des Abgasförderdrucks beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Der Abgasförderdruck stellt einen sehr wichtigen Betriebsparameter dar. Er bestimmt die Menge der zugeführten Verbrennungsluft und folglich auch den Abgasvolumenstrom bzw. die aktive Verweilzeit. Eine harmonische Synergie zwischen der Abgasanlage und den Einzelraumfeuerungsanlagen ist für einen stabilen Betrieb unerlässlich. Für gewöhnlich werden handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen während einer Typprüfung mit einem Abgasförderdruck von 12 Pascal betrieben. Einzelraumfeuerungsanlagen weisen meistens keine Verbrennungs- und Betriebsstabilität gegenüber einer Änderung dieser Größe auf. Eine detaillierte Erläuterung über den Einfluss des Abgasförderdrucks im Schornstein auf die Verbrennung im Praxisbetrieb ist in Abschnitt 3.3.2 dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Abgasförderdruck während des Betriebs des freistehenden Raumheizers variiert. Ziel dieser Untersuchung ist es, den Einfluss des Abgasförderdrucks auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten durch den Einsatz der Einbautentechnik in allen Betriebsphasen (Startbetriebsphase, Regelbetriebsphase sowie Ausbrandbetriebsphase) zu ermitteln. Es ist zu erwähnen, dass es bisher keine klare Definition für die Betriebsphasen gibt. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Phasen wie folgt definiert. Die Startbetriebsphase beginnt ab dem Zeitpunkt, an dem die Tür der Feuerungsanlage geschlossen wird, und dauert bis die Konzentration des Kohlenstoffmonoxids unter den Grenzwert gemäß der 1. BImSchV (1.250 mg/Vm³) sinkt und auf einem niedrigen Niveau bleibt. Ab dem Punkt, an dem die Konzentration des Kohlenstoffmonoxids erneut

über den Grenzwert ansteigt bzw. eine steigende Tendenz beibehalten wird, beginnt die Ausbrandphase, welche bis zur neuen Beschickung der Feuerungsanlage andauert. Sollten die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids während des Abbrands nicht unter den Grenzwert sinken, gilt die Verbrennung bzw. der Betrieb des Raumheizers als nicht sachgemäß.

Das Diagramm 13 sowie das Diagramm 14 zeigen die Mittelwerte des Kohlenstoffmonoxids aus mehreren Abbränden während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne Einbauten bei einem Abgasförderdruck von 12 Pascal und mit keramischen (Pall-Ringe 50 mm) bzw. metallischen (Pall-Ringe 35 mm) Einbautenmodulen bei Abgasförderdrücken von 8, 12 und 16 Pascal. Zur deutlichen Darstellung und besseren Vergleichbarkeit der Mittelwerte werden die Konzentrationen über einen normierten Zeitraum von 45 Minuten dargestellt.

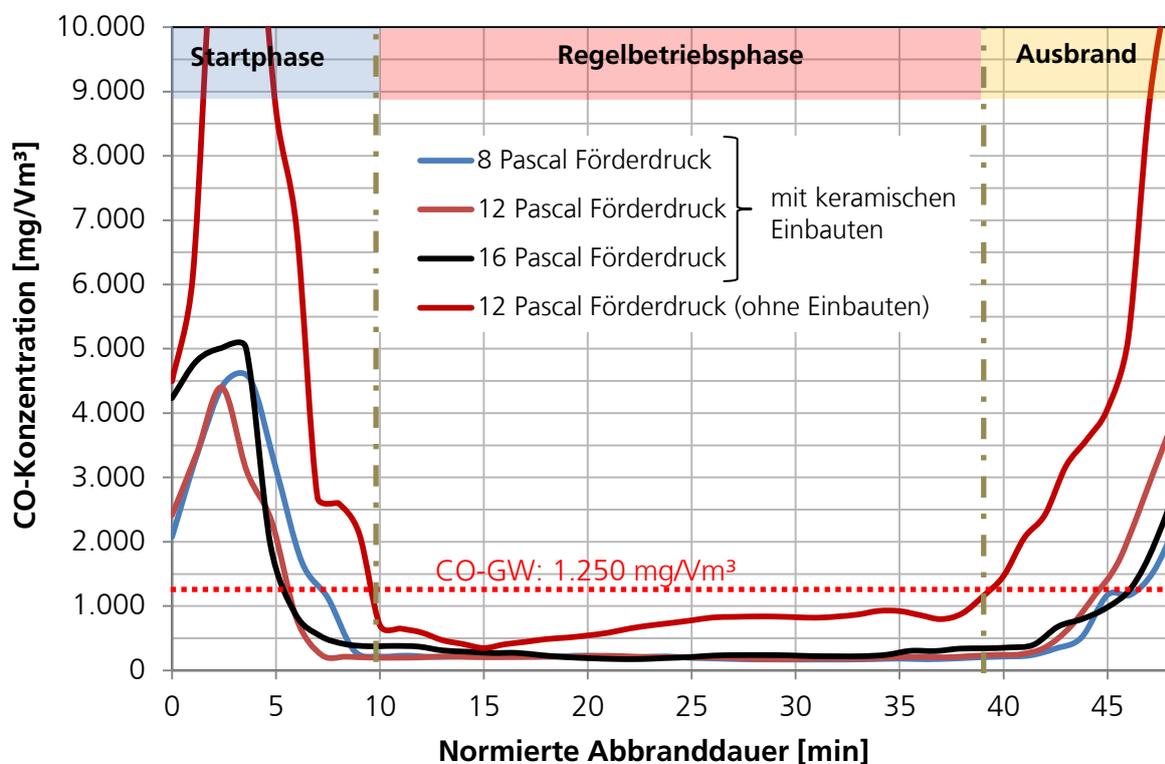


Diagramm 13: Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit keramischen Einbauten bei Abgasförderdrücken von 8, 12 und 16 Pascal.

Dem Diagramm 13 ist zu entnehmen, dass die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids in allen Betriebsphasen mit den keramischen Einbauten deutlich reduziert wurden. In der Startbetriebsphase bzw. nach der Beschickung liegen die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids unter 6.000 mg/Vm^3 unabhängig von dem eingestellten Abgasförderdruck, wobei sie ohne den Einsatz der Einbauten (unter optimalen Betriebsbedingungen) auf über 13.000 mg/Vm^3 ansteigen. Im Diagramm 13 ist auch ersichtlich, dass die Startphase zeitlich verkürzt ist. Diese Verbesserung lässt sich mit der ausreichend gespeicherten Energie in Form von Wärme im Einbautenmodul

begründen, wodurch die nötige Oxidationstemperatur in diesen Betriebsphasen, unabhängig vom Abgasförderdruck des Verbrennungsprozesses, schneller erreicht und aufrechterhalten wird. Die in den Einbauten integrierten Turbulatoren sorgen für eine intensive Durchmischung der nicht verbrannten Bestandteile mit dem vorhandenen Sauerstoff, sodass die Oxidation gefördert wird.

In Diagramm 14 sind die Verläufe des Kohlenstoffmonoxids als Mittelwerte über mehrere Abbrände mit metallischen Einbauten dargestellt. In Diagramm 14 ist zu ersehen, dass wie beim Einsatz von metallischen Einbauten niedrigere Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid erzielt werden können als ohne die Einbauten. Die hohen Konzentrationen bei einem Abgasförderdruck von 8 Pascal in der Startphase sind auf den Mangel an Sauerstoff zurückzuführen. Bei einer festen Einstellung der Verbrennungsluft gilt, je niedriger der Abgasförderdruck, desto geringer ist die zugeführte Verbrennungsluftmenge.

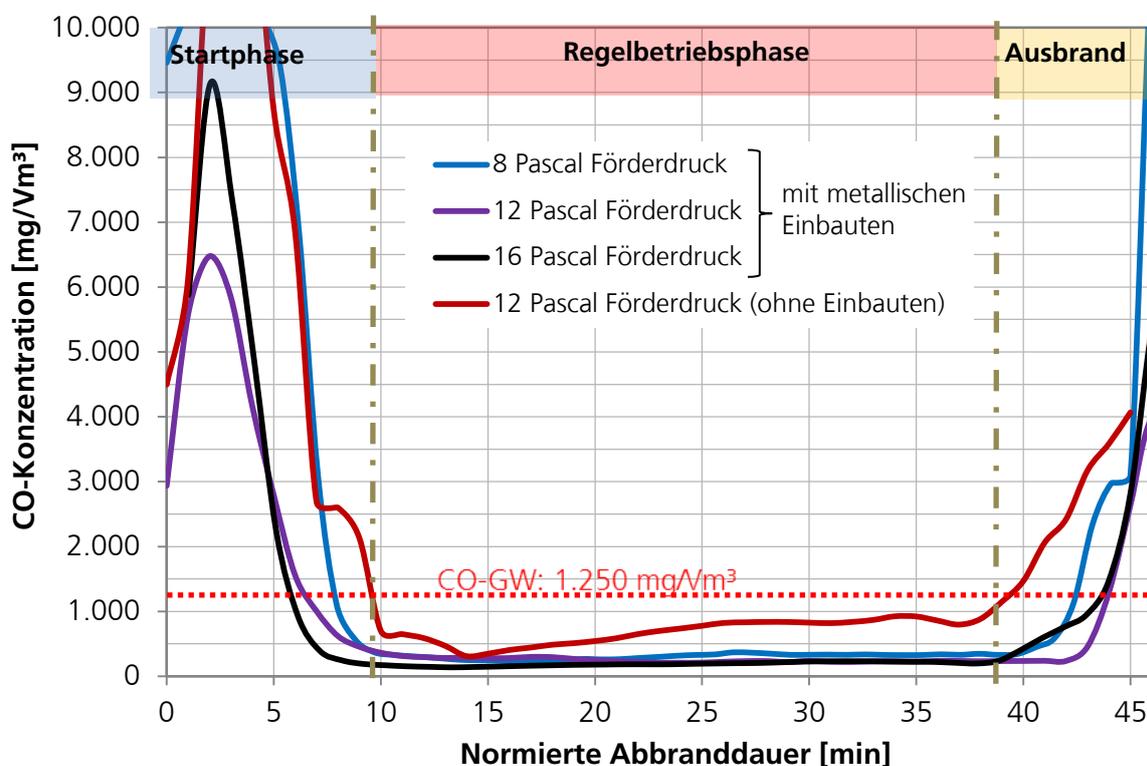


Diagramm 14: Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit metallischen Einbauten bei Abgasförderdrücken von 8, 12 und 16 Pascal.

Da die Startphase früher eintritt und die Ausbrandbetriebsphase aufgrund der im Einbautenmodul gespeicherten Wärme, welche die Oxidation beim Sinken der Temperaturen im Feuerraumbereich fördert, verkürzt bzw. zeitlich verzögert wird, ist die Regelbetriebsphase beim Einsatz der Einbautentechnik deutlich länger. Beim Betrieb mit der Einbautentechnik, unabhängig von den verwendeten Einbauten, wird die Regelbetriebsphase verlängert und hinsichtlich der Emissionen verbessert. Die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids in der Regelbetriebsphase schwanken zwischen 150 mg/Vm³ und

250 mg/Vm³. Ohne den Einsatz der Einbautentechnik steigen die Konzentrationen bereits während des Betriebs auf über 800 mg/Vm³. Dadurch wird die Einhaltung der gesetzlich geforderten Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid mit diesem Prototypen erschwert.

Bei einem Vergleich der Konzentrationen von Diagramm 13 (Betrieb des Raumheizers mit keramischen Einbauten) und Diagramm 14 (Betrieb des Raumheizers mit metallischen Einbauten) wird deutlich, dass mit keramischen Einbauten eine bessere Oxidationsleistung für Kohlenstoffmonoxid erreicht werden kann als mit metallischen Einbauten. Mit metallischen Einbauten schwanken die Mittelwerte bei einer Variation des Abgasförderdrucks zwischen 582 mg/Vm³ und 791 mg/Vm³. Beim Betrieb des Raumheizers mit keramischen Einbauten liegen die Mittelwerte zwischen 379 mg/Vm³ und 606 mg/Vm³. Während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne Einbautentechnik wurden unter Prüfbedingungen bzw. optimalen Betriebseinstellungen mittlere Konzentrationen von über 1.350 mg/Vm³ gemessen. Die Ergebnisse bzw. Mittelwerte aus den Versuchsreihen sind in Abschnitt 6.1.2.4 tabellarisch aufgelistet. Beim Betrieb des Raumheizers mit Einbautentechnik wurden reproduzier- und wiederholbare Messergebnisse erzielt. Das heißt, dass zwischen den Auflagen und Versuchstagen mit gleichen Betriebseinstellungen vergleichbare Ergebnisse bzw. Mittelwerte gemessen wurden. Abweichend davon, waren die Ergebnisse aus den Versuchsreihen ohne Einbautentechnik weder reproduzierbar noch wiederholbar. Die Schwankungen der Mittelwerte zwischen den Versuchen waren trotz gleicher Betriebseinstellungen sehr hoch. In einigen Versuchen wurden mittlere Konzentrationen an Kohlenmonoxid von über 3.000 mg/Vm³ gemessen.

Variation der Brennstoffmasse beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Eine Erhöhung der zugeführten Brennstoffmasse führt zur Erhöhung der thermischen Leistung und die Abbranddauer wird verlängert. Bei einer Verringerung der Brennstoffmasse verhält es sich umgekehrt. Hier muss erwähnt werden, dass der Brennstoffdurchsatz (pro Zeiteinheit zu verbrennende Brennstoffmasse) bei der Verbrennung in Einzelraumfeuerungsanlagen nicht linear ist. Beispielsweise findet in der Startbetriebsphase eine starke Vergasung der gesamten Brennstoffmasse mit entsprechend hohem Sauerstoffverbrauch statt. In den weiteren Betriebsphasen nimmt die Intensität der Vergasung mit dem Sauerstoffbedarf entsprechend ab. Da die Verbrennungsluftzufuhr bei Einzelraumfeuerungsanlagen bisher nicht geregelt wird, entsteht während der Startphase ein Sauerstoffmangel. Daraus resultiert eine höhere Konzentration an nicht verbrannten Bestandteilen im Abgas. Hier gilt, je größer die beschickte Brennstoffmasse, desto höher sind die Schadstoffkonzentrationen. Während der Regelbetriebsphase nimmt der Sauerstoffverbrauch aufgrund abnehmender Vergasungsintensität allmählich ab. Dabei wird die Feuerungsanlage mit höheren Luftüberschusszahlen betrieben. Die zugeführte Sauerstoffmenge ist meistens für eine sachgemäße Verbrennung ausreichend.

Mit der Zeit sinkt die Vergasungsintensität aufgrund des Brennstoffverbrauchs ab, sodass der Verbrennungsprozess mit höherem Sauerstoffüberschuss betrieben wird. Dadurch findet eine ungünstige Kühlung des Feuerraums statt, bei der keine guten Oxidationsbedingungen gewährleistet werden können.

Der Beitrag der Einbautentechnik zur Verbesserung der Verbrennung in der Startbetriebsphase ergibt sich aus der Förderung der Turbulenz bzw. Durchmischung des Sauerstoffs mit den brennbaren Bestandteilen innerhalb des Einbautenmoduls sowie einer schnellen Einstellung von günstigen Oxidationstemperaturen. Dadurch lässt sich die Verbrennung mit geringerem Sauerstoffgehalt, im Vergleich zum Betrieb ohne Einbautentechnik, besser betreiben. In der Regelbetriebsphase agiert das Einbautenmodul wie ein Reaktor, in dem die optimalen Oxidationsbedingungen eingestellt werden können, wodurch die Verbrennung unabhängig von der Dynamik des Vergasungsprozesses besser und stabiler stattfinden kann, als beim Betrieb ohne Einbautentechnik. Die während der Verbrennung im Einbautenmodul gespeicherte Wärme wird in der Ausbrandphase dafür sorgen, ausreichend hohe Temperaturen für die Oxidation über längere Betriebszeit bereitzustellen. Der Abkühlungseffekt in der Ausbrandphase wird abgeschwächt.

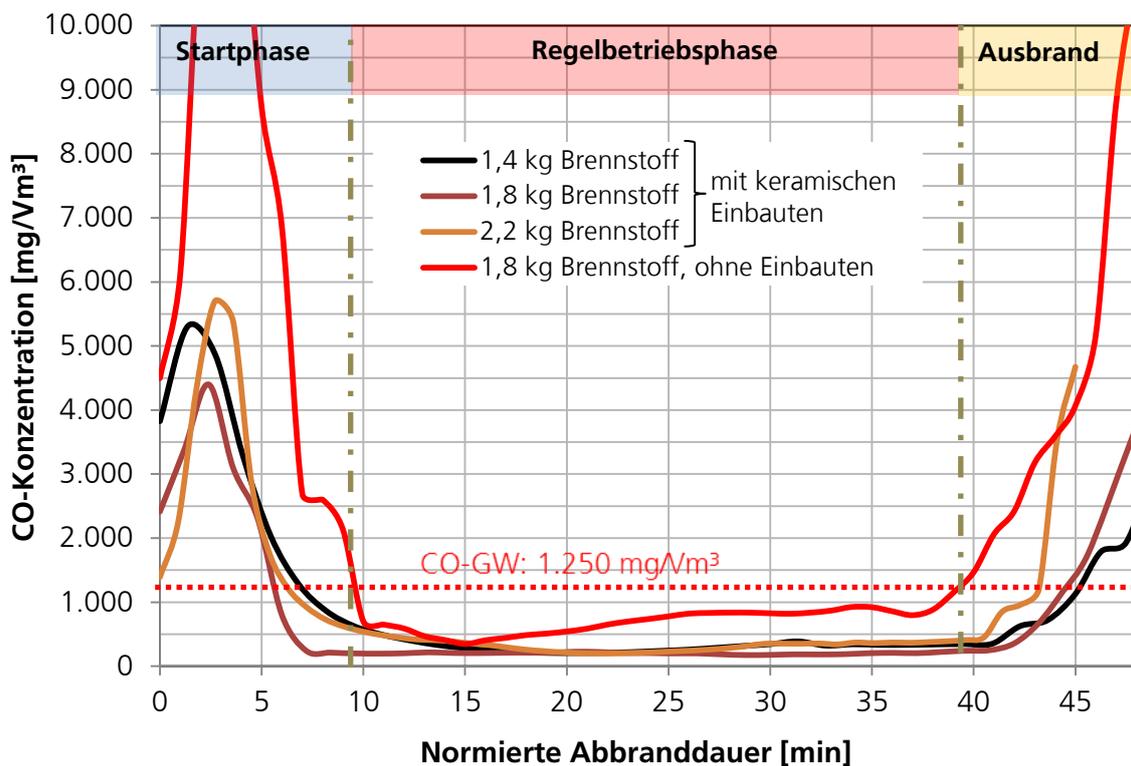


Diagramm 15: Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit keramischen Einbauten bei unterschiedlichen Brennstoffmassen.

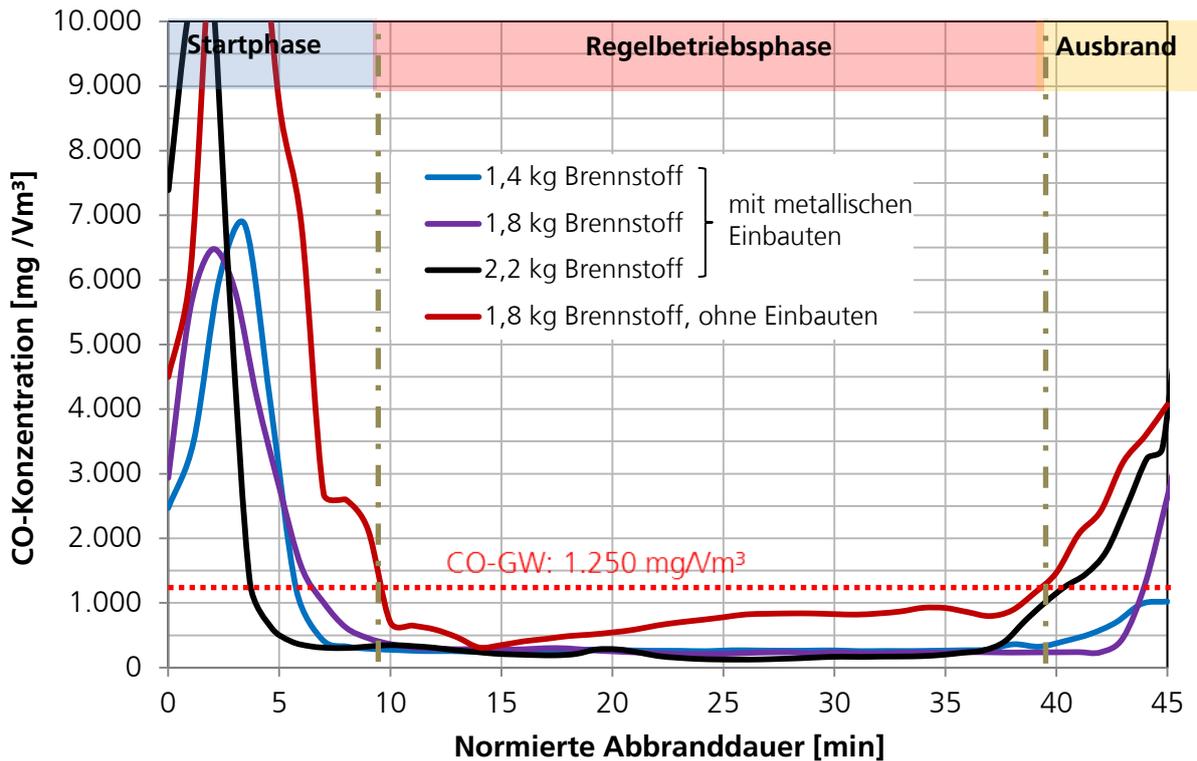


Diagramm 16: Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit metallischen Einbauten bei unterschiedlichen Brennstoffmassen.

Im Diagramm 15 sind die Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers bei unterschiedlichen Brennstoffmassen mit keramischen Einbauten (1,4 kg/Auflage, 1,8 kg/Auflage und 2,2 kg/Auflage mit drei Scheiten) und ohne Einbautentechnik mit optimaler Betriebseinstellung und dargestellt. Dem Diagramm 15 ist zu entnehmen, dass die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs mit keramischen Einbauten in jeder Betriebsphase deutlich geringer sind, als beim Betrieb ohne Einbautenmodule. Im Diagramm 15 ist außerdem ersichtlich, dass die Konzentration des Kohlenstoffmonoxids beim Einsatz der Einbautentechnik unabhängig von der Brennstoffmasse ähnlich stabile Verläufe besitzt. Während der Startbetriebsphase liegen die Konzentrationsspitzen unter 6.000 mg/Vm³. Während der Regelbetriebsphase werden stabile Konzentrationsverläufe generiert, bei denen die Werte des Kohlenstoffmonoxids zwischen etwa 200 bis 300 mg/Vm³ schwanken.

Die Wirkung der Einbautenmodule ist am Ende des Abbrands deutlich festzustellen. Durch die Abgabe der während der Verbrennung gespeicherten Energie wird die Oxidation in der Ausbrandbetriebsphase deutlich verbessert. Die Verbrennung wurde auch beim Einsatz von metallischen Einbauten verbessert. Im Diagramm 16 sind die Verläufe des Kohlenstoffmonoxids beim Betrieb mit metallischen Einbauten dargestellt. Ähnlich wie beim Betrieb mit keramischen Einbauten, kann mit metallischen Einbautenmodulen eine Reduzierung der Konzentrationen in allen Betriebsphasen erreicht werden. Beim Betrieb mit 2,2 kg/Auflage steigt die Konzentration auf ca.

11.000 mg/Vm³ an. Das ist auf eine starke Vergasung bzw. auf einen Mangel an Sauerstoff zu Beginn der Verbrennung zurückzuführen. In der Regelbetriebsphase liegen die Konzentrationen zwischen 150 mg/Vm³ und 300 mg/Vm³. In der Ausbrandphase steigen die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids mit metallischen Einbauten früher an als beim Betrieb mit keramischen Einbauten. Das ist mit der geringeren Speichermasse der metallischen Einbauten zu begründen, sodass in dieser Betriebsphase nur wenig Energie für eine gute Oxidation bereitgestellt werden kann.

Zusammengefasst wurde durch den Einsatz der Einbautentechnik unabhängig von der beschickten Brennstoffmasse eine bedeutsame Reduzierung des Kohlenstoffmonoxids in allen Betriebsphasen erzielt. Die Einbautentechnik verleiht der Verbrennung eine sehr hohe Flexibilität gegenüber der Variation der Brennstoffmasse.

Variation der Scheitenanzahl beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Bei der Variation der Scheitenanzahl wird die Verbrennung aufgrund einer Vergrößerung der Oberfläche, welche mit der Verbrennungsluft sowie mit dem Glutbett in Kontakt kommt und an der Vergasung bzw. Verbrennung teilnimmt, massiv beeinflusst. Es gilt, je größer die aktive Oberfläche, desto intensiver verläuft die Verbrennung bzw. umso schneller wird der Sauerstoff verbraucht. Dadurch und aufgrund einer fehlenden Regelung der Verbrennungsluftzufuhr entwickelt sich im Verbrennungsprozess ein Sauerstoffmangel, wodurch der Ausstoß nicht verbrannter Bestandteile ansteigt. Im Diagramm 17 sowie im Diagramm 18 sind die Verläufe des Kohlenstoffmonoxids beim Betrieb des Raumheizers ohne und mit keramischen sowie metallischen Einbauten dargestellt. Beim Betrieb mit Einbauten wurden Auflagen mit 3 und 4 Scheiten mit einer gesamten Masse von 1,8 kg/Auflage verwendet und dem Betrieb ohne Einbauten bei Auflagen mit drei Scheiten bzw. einer gesamten Brennstoffmasse von 1,8 kg/Auflage gegenübergestellt.

Es wurde festgestellt, dass die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid beim Einsatz von keramischen Einbauten in allen Betriebsphasen deutlich niedriger sind als ohne Einbauten. Aus der Startphase wird deutlich, dass die Spitze der Konzentration bei einer Erhöhung der Scheitenanzahl von 4.500 mg/Vm³ auf etwa 6.000 mg/Vm³ ansteigt. Dieser Anstieg lässt sich auf eine intensive Vergasung zu Beginn der Verbrennung zurückführen.

Im Diagramm 18 sind die Verläufe der Konzentration des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs ohne Einbauten sowie mit metallischen Einbautenmodulen mit 3 und 4 Scheiten dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass durch den Einsatz der metallischen Einbautenmodule trotz einer Variation der Scheitenanzahl eine deutliche Reduzierung des Kohlenstoffmonoxids gegenüber dem Betrieb ohne Einbauten erzielt wurde. Außerdem ist dem Diagramm zu entnehmen, dass die Variation des Förderdrucks in keiner Betriebsphase zu einer Verschlechterung des Betriebs geführt hat.

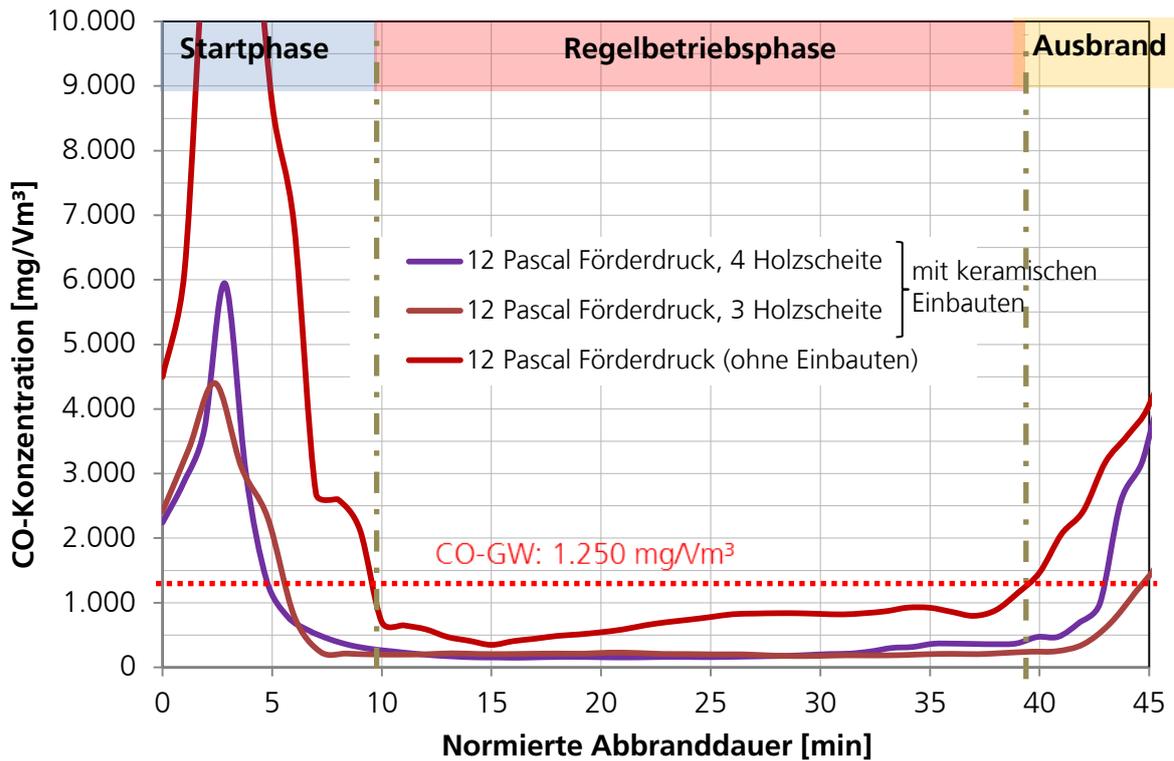


Diagramm 17: Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit keramischen Einbauten mit drei und vier Scheiten.

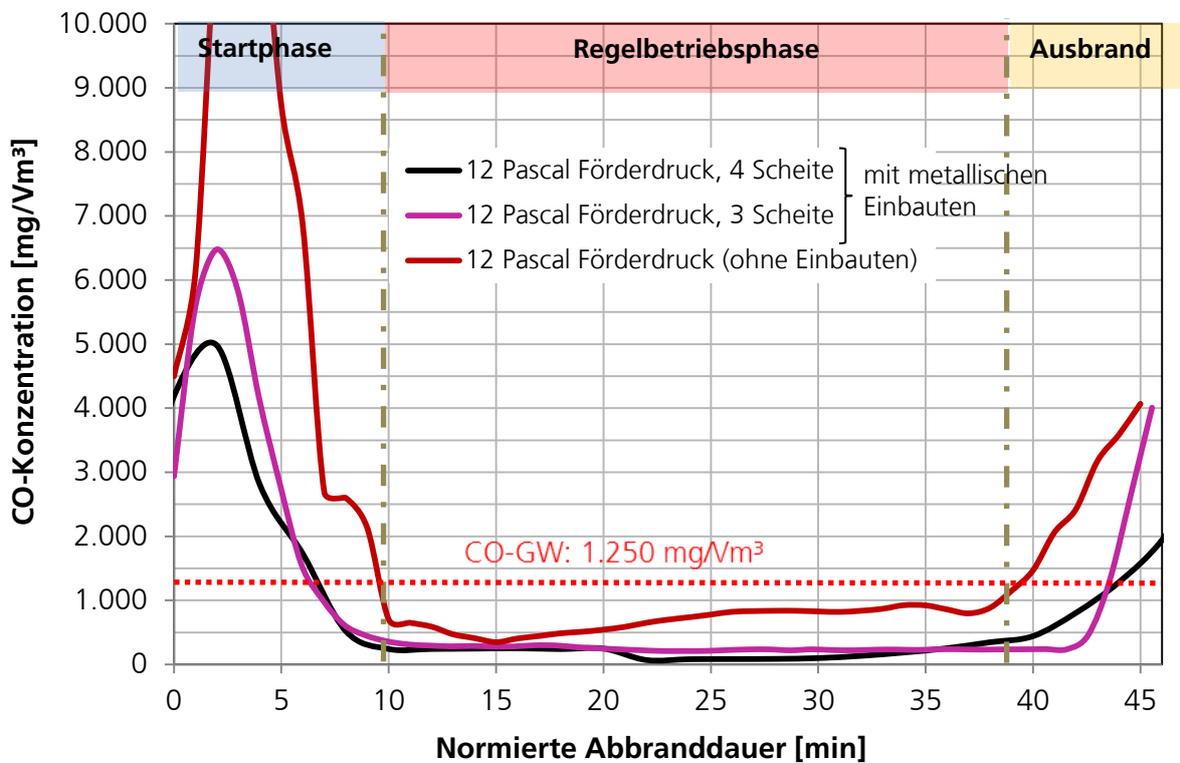


Diagramm 18: Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit metallischen Einbauten mit drei und vier Scheiten.

Es ist zu erwähnen, dass sich eine weitere Erhöhung der Scheitenanzahl bei gleicher Brennstoffmasse praktisch als nicht zielführend erwies, da die Größe der Holzscheite zur Simulation eines praxisnahen Betriebs nicht mehr angemessen war. Bei einer Verringerung der Scheitenanzahl von drei auf zwei Scheiten pro Auflage gestaltete sich besonders die Startphase der Verbrennung schwierig, da die Oberfläche für eine rasche Zündung der Hölzer zu klein wurde. Aus diesen Gründen wurde die Einbautentechnik mit zwei bzw. mehr als vier Scheiten nicht untersucht.

Variation des Brennstoffs

Die Art des verwendeten Brennstoffs ist eines der wichtigsten Parameter zur Einstellung eines sicheren und emissionsarmen Betriebs von Einzelraumfeuerungsanlagen. Die Brennstoffe, die in Einzelraumfeuerungsanlagen verwendet werden dürfen, sind im Paragraph 3 der 1. BImSchV aufgelistet. Es gibt eine Reihe von Eigenschaften, durch die die Qualität des Brennstoffs zur Verbrennung beeinflusst wird.

- **Spezifische Oberfläche:** Die spezifische Oberfläche beschreibt die Oberfläche des Brennstoffs pro Brennstoffmasse. Sie hat einen starken Einfluss auf die Intensität der Zündung und die Intensität der Verbrennung. Bei hohen spezifischen Oberflächen kann der Brennstoff schneller vergast und eine entsprechende Brenngasmenge produziert werden.
- **Wärmeleitfähigkeit:** Die Wärmeleitfähigkeit hat einen großen Einfluss auf den Wärmeaustausch und den Verbrennungsvorgang im Festbrennstoff. Dadurch wird die Umwandlungsgeschwindigkeit des Brennstoffs bestimmt.
- **Zündtemperatur:** Die Zündtemperatur beschreibt die Temperatur, bis zu der ein Brennstoff aufgeheizt werden muss, damit sich dieser entzündet. Sie hat deshalb einen großen Einfluss auf die Kinetik des Verbrennungsprozesses. Für Holzbrennstoffe liegt die Zündtemperatur für gewöhnlich bei etwa 300 °C.
- **Reaktionsfähigkeit:** Die Reaktionsfähigkeit ist eine stoffliche Eigenschaft des Festbrennstoffs. Sie beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich der Brennstoff bei einem zugegebenen Vergasungsmittel und bestimmten Druck-, Temperatur- und Strömungsverhältnissen umsetzen lässt.
- **Spezifisches Gewicht:** Das spezifische Gewicht ist der Kehrwert der Dichte eines Brennstoffs. Je geringer die Dichte des Brennstoffs ist, desto schneller kann die in dem Brennstoff enthaltene Energie freigesetzt werden.
- **Heizwert:** Der massenbezogene Heizwert beschreibt die auf die Masse bezogene nutzbare Energiemenge. Hier gilt, je höher der

massenbezogene Heizwert des Brennstoffs ist, desto mehr Energie kann dieser während des Verbrennungsprozesses freisetzen.

- **Zusammensetzung:** Für die Qualität des Brennstoffs hat der Anteil brennbarer Bestandteile einen maßgeblichen Einfluss. Auch der Massenanteil von nicht brennbaren Bestandteilen und der Wasser- bzw. Feuchtegehalt sind wichtige Einflussgrößen für das Verbrennungs- und Emissionsverhalten.
- **Flüchtige Bestandteile:** Flüchtige Bestandteile sind flüchtige gasförmige Verbindung, die während der Erwärmung des Brennstoffs unter Sauerstoffabschluss entstehen. Ihr Anteil hängt von der Art des Brennstoffs ab. Der Einfluss flüchtiger Bestandteile ist bei handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen besonders während der Startphase anhand eines schnellen Anstiegs nicht verbrannter Bestandteile im Abgas feststellbar.

Der komplexe Zusammenhang dieser einzelnen Faktoren trägt maßgeblich zur Qualität des Verbrennungsvorgangs bei. Während einer Emissionsprüfung wird gemäß den Prüfnormen für gewöhnlich Buchenholz (Hartholz) verwendet. Fichtenholz (Weichholz) wird hingegen durch die vergleichsweise schnellere Wärmeentwicklung meistens ausschließlich während der Sicherheitsprüfung eingesetzt. Das Verbrennungs- und Emissionsverhalten von Weichhölzern unterscheidet sich von Harthölzern in allen oben aufgeführten Punkten. Charakteristisch für die Verbrennung von Weichhölzern ist eine schwer kontrollierbare bzw. sehr intensive Vergasungsreaktion. Dadurch ist grundsätzlich mit höheren nicht verbrannten Bestandteilen im Abgas zu rechnen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde der Einfluss einer Variation des Brennstoffs (Weichholz und Hartholz) mit und ohne Einbautentechnik in dem freistehenden Raumheizer untersucht. Wie bei den vorherigen Variationen soll durch den Einsatz der Einbautenmodule in dieser Versuchsreihe, unabhängig von der Art des naturbelassenen Brennstoffs, ein stabiler Betrieb gewährleistet werden.

Im Diagramm 19 sind die Mittelwertkurven der Konzentration von Kohlenstoffmonoxid mit und ohne Einbautentechnik während der Verbrennung von Fichten- und Buchenholz abgebildet. Dem Diagramm 19 ist zu entnehmen, dass bei der Verbrennung von Fichte ohne den Einsatz der Einbautentechnik die höchste Konzentration an Kohlenstoffmonoxid entsteht. In der Startphase steigt die Konzentration bei der Verbrennung von Fichte auf über 11.000 mg/Vm³. Die Dauer dieser Phase beträgt über 12 Minuten. Während des Betriebs mit metallischen Einbauten steigt die Konzentration des Kohlenstoffmonoxids auf etwa 9.800 mg/Vm³. Allerdings dauert die Startphase hier lediglich vier Minuten. Mit den keramischen Einbauten steigt die Konzentration des Kohlenstoffmonoxids lediglich auf 5.500 mg/Vm³ an. Ähnlich wie bei dem Versuch mit metallischen Einbauten, ist die Startphase auch in dieser Versuchsreihe zeitlich verkürzt worden.

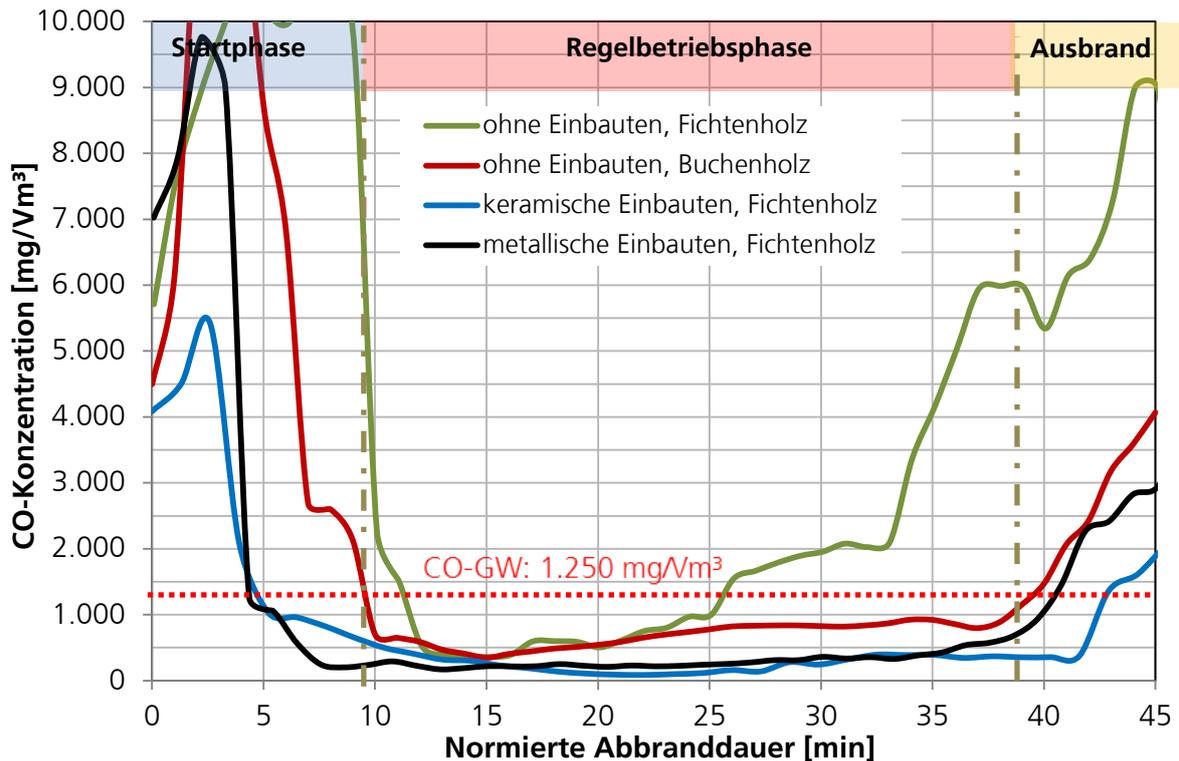


Diagramm 19: Verläufe des Kohlenstoffmonoxids während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei der Verbrennung von Fichten- und Buchenholz.

Durch den Einsatz der Einbautentechnik wurde die Konzentration des Kohlenstoffmonoxids mit beiden Brennstoffen, Buchen- und Fichtenholz, um 42 % mit metallischen und 45 % mit keramischen Einbauten bei der Verbrennung vom Buchenholz sowie 72 % mit metallischen und 51 % mit keramischen Einbauten bei der Verbrennung von Fichtenholz reduziert, sodass die Grenzwerte der 1. BImSchV mit beiden Brennstoffen eingehalten werden können. Die mittleren Konzentrationen liegen dabei zwischen 731 mg/Vm³ und 820 mg/Vm³ (siehe Tabelle 11).

Untersuchung zu Gesamtkohlenwasserstoffen

Der Begriff Gesamtkohlenwasserstoffe beschreibt aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe. Gemäß den Prüfnormen für Einzelraumfeuerungsanlagen werden die Gesamtkohlenwasserstoffe über ein Flammenionisationsdetektor (FID) ermittelt. Das Ansprechverhalten und somit das Messergebnis der FIDs ist stark von der Molekülstruktur der Kohlenwasserstoffe abhängig, sodass einige Verbindungen wie z.B. Ameisensäure messtechnisch nur sehr schwer oder gar nicht erfasst werden. Alternativ zum FID lassen sich Kohlenwasserstoffverbindungen im Abgas über ein Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR) erfassen. Der Vorteil dieses Verfahrens beruht auf der differenzierten Erfassbarkeit flüchtiger organischer Verbindungen. Dadurch lassen sich die einzelnen Kohlenwasserstoffverbindungen (Tabelle 10) ermitteln, wodurch eine Summe aus den Einzelkomponenten als Gesamtwasserstoffe gebildet werden kann.

Gemäß der 1. BImSchV gibt es keine emissionsrechtlichen Anforderungen an Gesamtkohlenwasserstoffe bei der Emissionstypprüfung von Einzelraumfeuerungsanlagen. Aus toxikologischer Sicht und im Hinblick auf zukünftige Emissionsanforderungen der Ökodesign-Richtlinie (Tabelle 5) ist die Bewertung der Konzentration der Gesamtkohlenwasserstoffe von einer hohen Relevanz.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Wirkung der Einbautentechnik auf die Minderung der Gesamtkohlenwasserstoffe, wie bei Kohlenstoffmonoxid, ausführlich untersucht. Anschließend wurde der Einfluss einer Variation der Art und Masse des Brennstoffs, Scheitenanzahl sowie Abgasförderdrucke untersucht.

In Diagramm 20 sind die Konzentrationsverläufe der Gesamtkohlenwasserstoffe ohne und mit Einbautentechnik (metallische und keramische Einbauten) über mehrere Abbrände dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs durch den Einsatz der Einbautentechnik maßgeblich reduziert wurden.

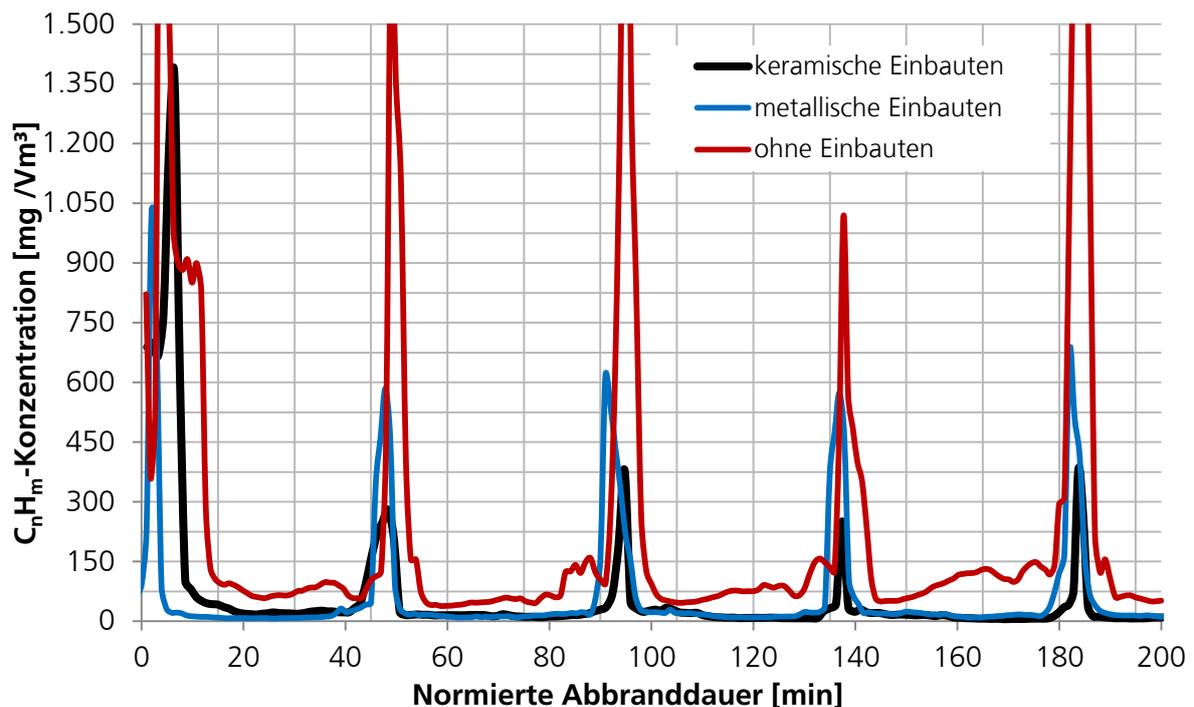


Diagramm 20: Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs ohne sowie mit metallischen und keramischen Einbauten.

In den Start- und Ausbrandphasen steigen die Konzentrationen ohne Einbautentechnik auf über 1.500 mg/Vm³. Mit den metallischen Einbauten wurden die Konzentrationen an Gesamtkohlenwasserstoffen (gemessen als Propan durch FID) auf etwa 650 mg/Vm³ in der Startbetriebsphase reduziert. Die niedrigste Konzentration wurde mit keramischen Einbauten erreicht. Dabei liegt der höchste Wert bei unter 400 mg/Vm³. Die Verbesserung des

Emissionsverhaltens in dieser Betriebsphasen (Start- und Ausbrandphasen) wird durch die Wärmespeicherung und Bereitstellung durch die Einbautentechnik erreicht. Hier können hohe Oxidationstemperaturen aufrechterhalten bzw. schneller erreicht werden, sodass flüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen oxidiert und hohe Spitzen der Konzentration von Gesamtkohlenwasserstoffen vermieden werden.

Die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe in der Regelbetriebsphase verlaufen mit der Einbautentechnik stabiler. Dabei schwankt die Konzentrationen zwischen 8 mg/Vm^3 und 13 mg/Vm^3 . Ohne die Einbautentechnik steigen die Konzentrationen während des Regelbetriebs aufgrund nicht ausreichender Temperaturen auf über 60 mg/Vm^3 an.

Mit der Einbautentechnik konnten die Kohlenwasserstoffkonzentrationen unter den optimierten Betriebseinstellungen in allen Betriebsphasen reduziert werden. Mit den keramischen Einbautenmodulen kann eine höhere Reduktion erreicht werden als mit den metallischen.

Variation des Abgasförderdrucks beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Durch die Änderung des Abgasförderdrucks kann das Verbrennungs- und Emissionsverhalten von Feuerungsanlagen stark beeinflusst werden. Die negativen Auswirkungen sind oben ausführlich erläutert (siehe Variation des Abgasförderdrucks, S. 92). Im Zuge dieser Forschungsarbeit wurde der Einfluss einer Variation des Abgasförderdrucks auf die Bildung von Gesamtkohlenwasserstoffen während des Betriebs mit der Einbautentechnik untersucht. Im Diagramm 21 und Diagramm 22 sind die Mittelwerte der Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne Einbauten bei einem Abgasförderdruck von 12 Pascal und mit keramischen sowie metallischen Einbauten bei Abgasförderdrücken von 8, 12 und 16 Pascal dargestellt. Es ist ersichtlich, dass alle Betriebsphasen mit der Einbautentechnik verbessert bzw. hohe Konzentrationen an Gesamtkohlenwasserstoffen (gemessen als Propan mit FID) vermieden wurden.

Aus Diagramm 21 ist außerdem abzulesen, dass die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe während der Startbetriebsphase ohne die Einbautentechnik auf über 1.100 mg/Vm^3 ansteigen. Mit den keramischen Einbauten liegen die Konzentrationen bei gleichem Abgasförderdruck unterhalb von 400 mg/Vm^3 . Bei einer Variation des Abgasförderdrucks zwischen 8 Pascal und 16 Pascal kommt es zwar zu einem leichten Anstieg an Gesamtkohlenwasserstoffen, jedoch bleiben auch hier die Konzentrationen deutlich unter 600 mg/Vm^3 .

Während der Regelbetriebsphase können die Gesamtkohlenwasserstoffe unabhängig vom Abgasförderdruck auf einem niedrigen bzw. stabilen Niveau gehalten werden. Dabei schwanken die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe leicht zwischen 8 mg/Vm^3 und 18 mg/Vm^3 und verhalten sich, wie bei Kohlenstoffmonoxid (siehe Variation des Abgasförderdrucks, S. 92),

konstant. Eine Variation des Abgasförderdrucks hat folglich keinen Einfluss auf die Stabilität des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens im Regelbetrieb. Die Einbautentechnik hat dem gesamten Betrieb eine hohe Stabilität mit reproduzierbaren Versuchsergebnissen verliehen. Mit keramischen Einbauten wurde im Betrieb des freistehenden Raumheizers eine Reduzierung der Gesamtkohlenwasserstoffe bei optimalen Betriebseinstellungen von 87 %, bei einem Abgasförderdruck von 16 Pascal von 76 %, und bei einem Abgasförderdruck von 8 Pascal in Höhe von 70 % erreicht.

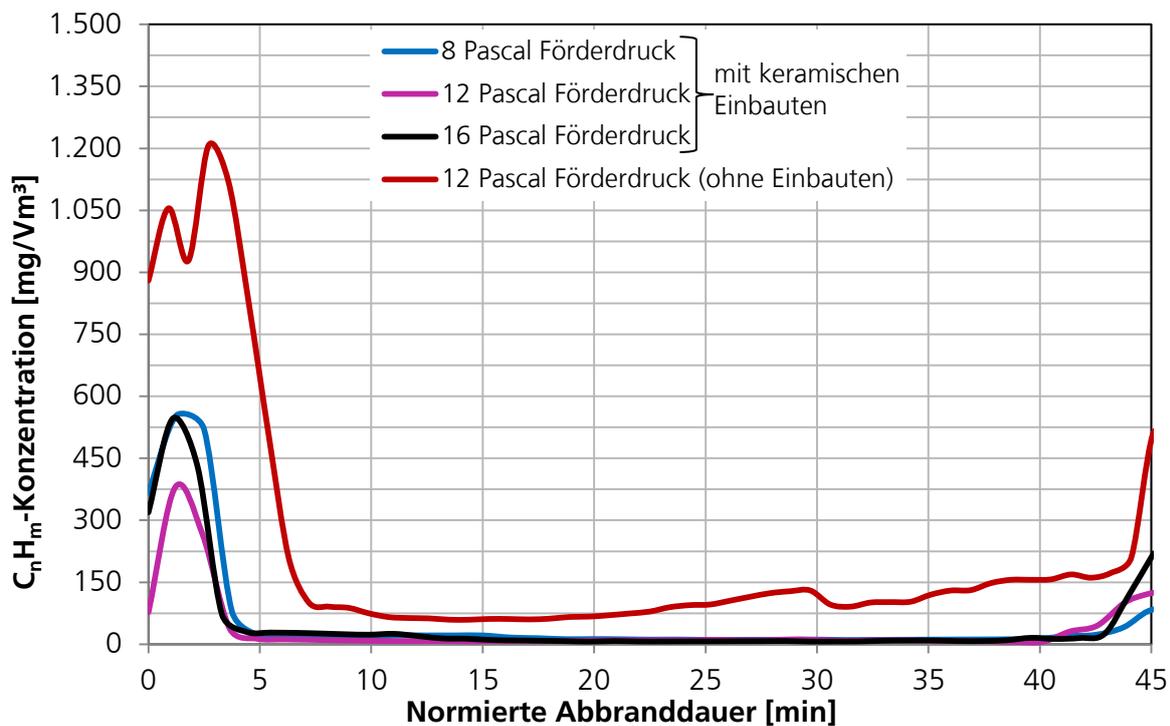


Diagramm 21: Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit keramischen Einbauten bei unterschiedlichen Abgasförderdrücken.

Auch mit den metallischen Einbauten wurden die Gesamtkohlenwasserstoffe maßgeblich reduziert. Aus dem Diagramm 22 ist abzulesen, dass sich die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe in den drei Phasen des Chargenabbrands nur sehr geringfügig von den Konzentrationen beim Betrieb mit keramischen Einbauten unterscheidet (siehe Diagramm 21). Das lässt sich damit begründen, dass die metallischen Einbauten durch ihre geringere Wärmespeicherkapazität weniger Wärme speichern können als die keramischen Einbauten. Dadurch können sie während der Start- und Ausbrandbetriebsphasen eine geringere Energiemenge zur vollständigen Oxidation bereitstellen. Aus diesem Grund sind die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe (gemessen als Propan mit FID) in der Anfahr- und Ausbrandbetriebsphase mit metallischen Einbauten etwas höher als mit keramischen Einbauten. Bei einem Abgasförderdruck von 8 Pascal liegen die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe bei etwa 950 mg/Vm³, während die Konzentrationen bei einem Abgasförderdruck von 16 Pascal auf ca. 1.060 mg/Vm³ ansteigen. Dieser Anstieg der Gesamtkohlenwasserstoffe

bei einem Abgasförderdruck von 8 Pascal lässt sich auf einen Sauerstoffmangel zurückführen, der während der Startbetriebsphase aufgrund intensiverer Vergasung entsteht. Wird die Einzelraumfeuerungsanlage mit einem höheren Abgasförderdruck bzw. mit 16 Pascal betrieben, wird zusätzlich zur Abkühlung der Flamme die Verweilzeit des Abgases in der aktiven Reaktionszone verkürzt und folglich die Verbrennung verschlechtert bzw. die Konzentrationen der nicht verbrannten Bestandteile wie z. B. Kohlenwasserstoffe entsprechend erhöht. In der Regelbetriebsphase schwanken die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Einsatz von metallischen Einbauten zwischen 10 mg/Vm³ und 20 mg/Vm³. Bei einem Abgasförderdruck von 12 Pascal lässt sich ein Minderungsgrad der Gesamtkohlenwasserstoffe von 74 % erreichen, hingegen lässt sich bei einem Abgasförderdruck von 8 Pascal ein Minderungsgrad von 70 % bzw. bei einem Abgasförderdruck von 16 Pascal ein Minderungsgrad von 61 % erzielen.

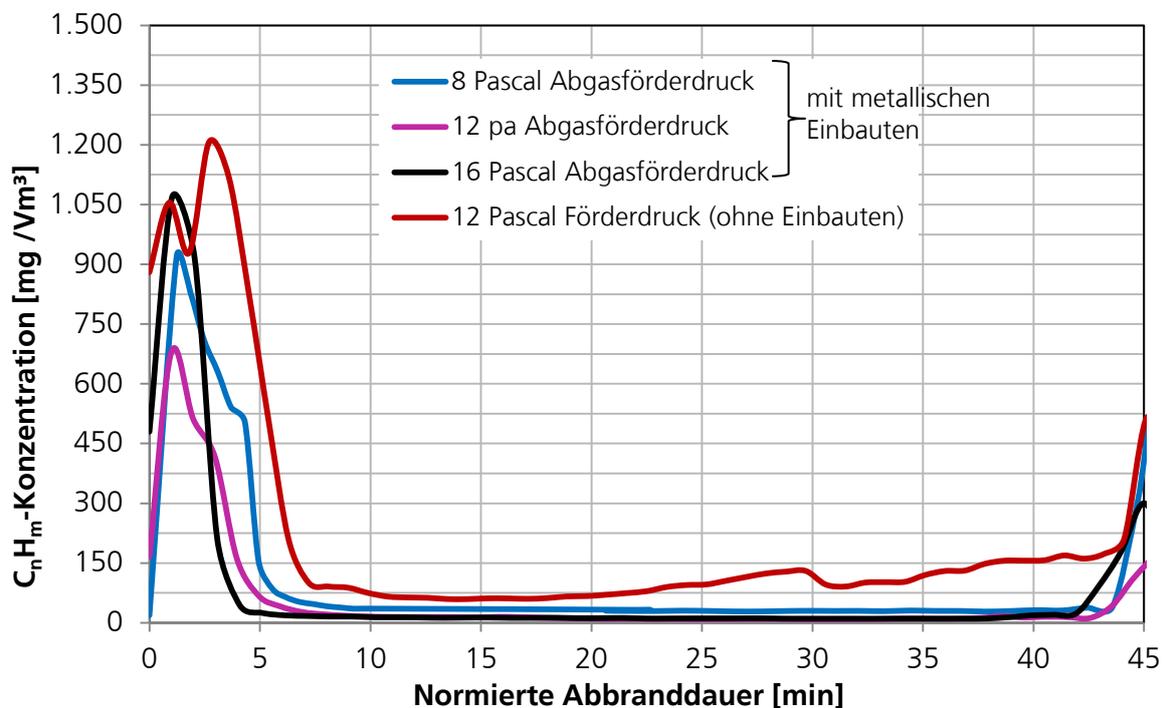


Diagramm 22: Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit metallischen Einbauten bei unterschiedlichen Abgasförderdrücken.

In der Regelbetriebsphase wird die Vergasung und somit die Verbrennung kontrollierter stattfinden. Die Einbautentechnik gewährleistet in der Regelbetriebsphase eine große Toleranz gegenüber der Variation des Abgasförderdrucks bzw. der zugeführten Verbrennungsluftmenge. Diese Toleranz ergibt sich aus der Verbesserung der Durchmischung des Abgases sowie aus der Bereitstellung der nötigen Wärmemenge für eine gute Oxidation, unabhängig von der Dynamik des Verbrennungsprozesses. Im Allgemeinen lässt sich die Aussagen treffen, dass die Toleranz gegenüber der Variation des Abgasförderdrucks bei keramischen Einbauten aufgrund der günstigen thermischen Materialeigenschaften höher ist als bei metallischen Einbauten.

Variation der Brennstoffmasse beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Über die zugeführte Brennstoffmasse werden die Leistung der Feuerungsanlage und die Abbranddauer maßgeblich beeinflusst. Die Auswirkung einer Variation der beschickten Brennstoffmasse auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten ist oben (siehe Variation der Brennstoffmasse, S. 95) detailliert erläutert. Im Diagramm 23 sind die Verläufe der Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne Einbautentechnik mit einer optimalen Einstellung (Tabelle 9) und mit keramischen Einbauten für den Betrieb mit Brennstoffmassen von 1,4, 1,8 und 2,2 kg/Auflage dargestellt.

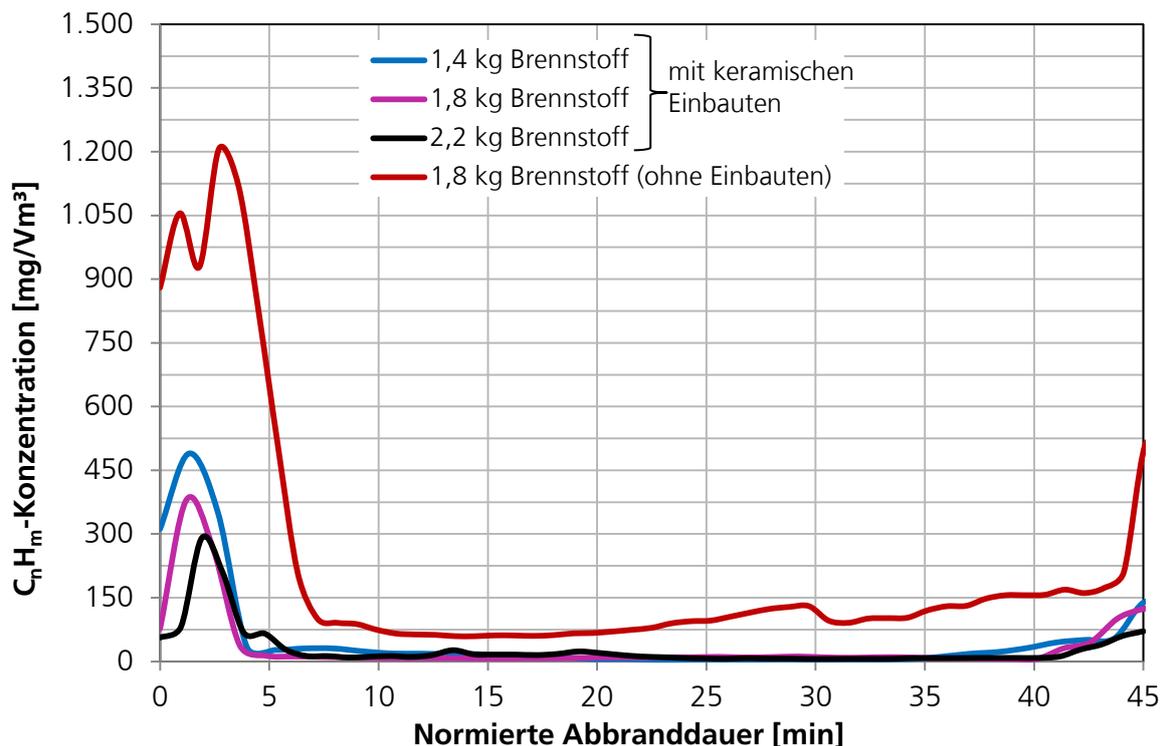


Diagramm 23: Verläufe der Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit keramischen Einbauten bei unterschiedlichen Brennstoffmassen.

Dem Diagramm 23 ist zu entnehmen, dass die Verbrennung durch die Verwendung der keramischen Einbauten unabhängig von der beschickten Brennstoffmasse stabiler verläuft. In der Startbetriebsphase liegen die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe hierbei zwischen 200 mg/Vm^3 und 500 mg/Vm^3 (gemessen als Propan mit FID). Im Vergleich liegen die Konzentrationen ohne Einbautentechnik bei über 1.000 mg/Vm^3 . In der Regelbetriebsphase schwanken die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe zwischen 8 mg/Vm^3 und 35 mg/Vm^3 . Hier ist die stabilisierende Wirkung der Einbautentechnik auf die Minderung der Gesamtkohlenwasserstoffe aufgrund der Bereitstellung nötiger Wärme und intensiverer Durchmischung der nicht verbrannten Bestandteile mit dem Sauerstoff deutlich zu erkennen. Die Einbauten sorgen bis zum Ende der Auflagen,

unabhängig von der zugeführten Brennstoffmasse, für niedrige Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe bzw. ein stabiles Betriebsverhalten. Die Konzentrationen schwanken dabei zwischen 8 mg/Vm³ und 35 mg/Vm³. Bei der Beschickung von 1,4 kg/Auflage beträgt der Minderungsgrad der Gesamtkohlenwasserstoffe 79 %. Während des Betriebs mit 2,2 kg/Auflage wird ein Minderungsgrad von 80 % erreicht (Tabelle 11).

Im Diagramm 24 sind die Verläufe der Gesamtkohlenwasserstoffe (gemessen als Propan mit FID) bei einer Variation der der Brennstoffmasse während des Betriebs mit metallischen Einbautenmodulen dargestellt. Es ist im Vergleich zum Diagramm 23 zu erkennen, dass die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb mit den metallischen Einbauten in den Start- und Ausbrandphasen höher sind als bei den keramischen Einbauten.

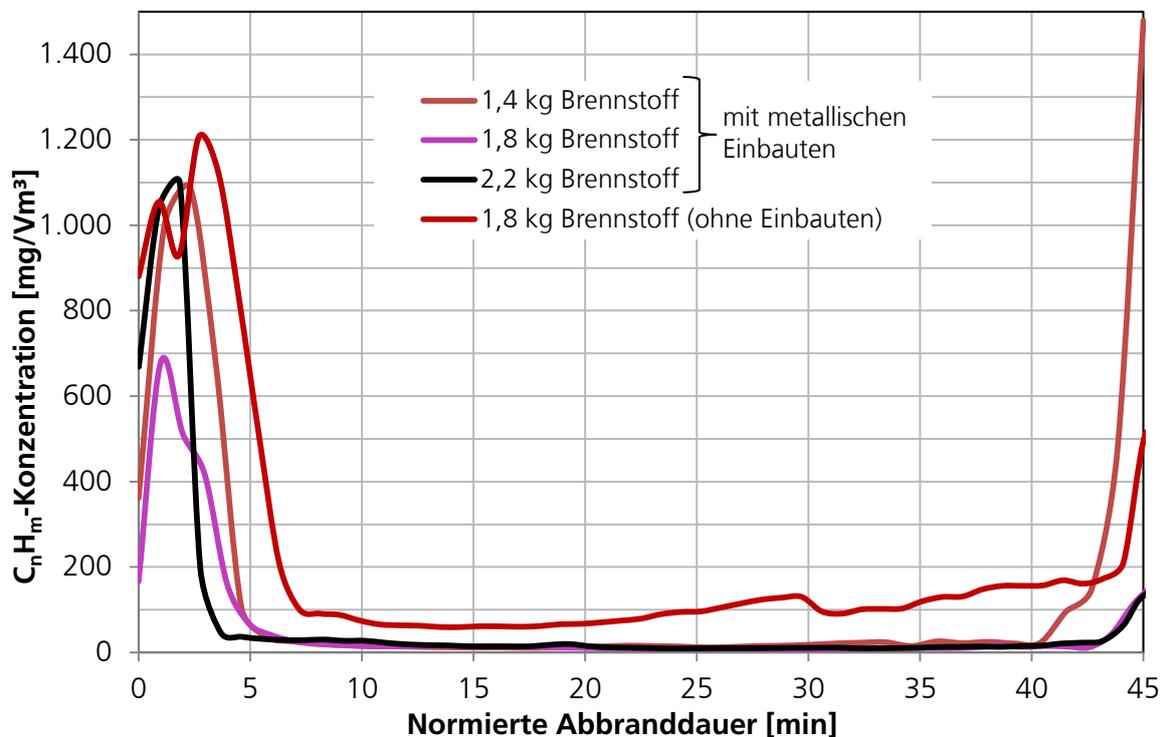


Diagramm 24: Verläufe der Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit metallischen Einbauten bei unterschiedlichen Brennstoffmassen.

Die metallischen Einbautenmodule reagieren in den Start- und Ausbrandphasen weniger flexibel auf eine Variation der Brennstoffmasse als die keramischen Einbauten, sodass die Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs mit 1,4 kg/Auflage und 2,2 kg/Auflage Brennstoff auf über 1.000 mg/Vm³ ansteigen. In der Regelbetriebsphase wird mit den metallischen Einbauten ein ähnlich stabiles Betriebs- und Emissionsverhalten erreicht, wie beim Betrieb mit den keramischen Einbauten. Die Konzentrationen schwanken in dieser Phase zwischen 13 mg/Vm³ und 25 mg/Vm³. Dabei wurde ein Minderungsgrad der Gesamtkohlenwasserstoffe in Höhe von 78 % bei der Beschickung von 1,4 kg/Auflage und 61 % bei der Beschickung von 2,2 kg/Auflage erreicht.

Variation der Scheitenanzahl beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Eine Variation Scheitenanzahl wirkt sich auf die Größe der Brennstoffoberfläche und dadurch stark auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten aus. Die betrieblichen Einflüsse einer Variation der Anzahl der Scheite sind im oberen Abschnitt (Variation der Scheitenanzahl, S. 98) ausführlich erläutert. In Diagramm 25 und Diagramm 26 sind die mittleren Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb des freistehenden Raumheizers ohne und mit keramischen bzw. metallischen Einbauten dargestellt. Bei den Versuchsreihen mit der Einbautentechnik wurde die Scheitenanzahl zwischen drei und vier Scheiten variiert. Die gesamte Auflagenmasse von 1,8 kg/Auflage wurde während dieser Versuchsreihe nicht verändert.

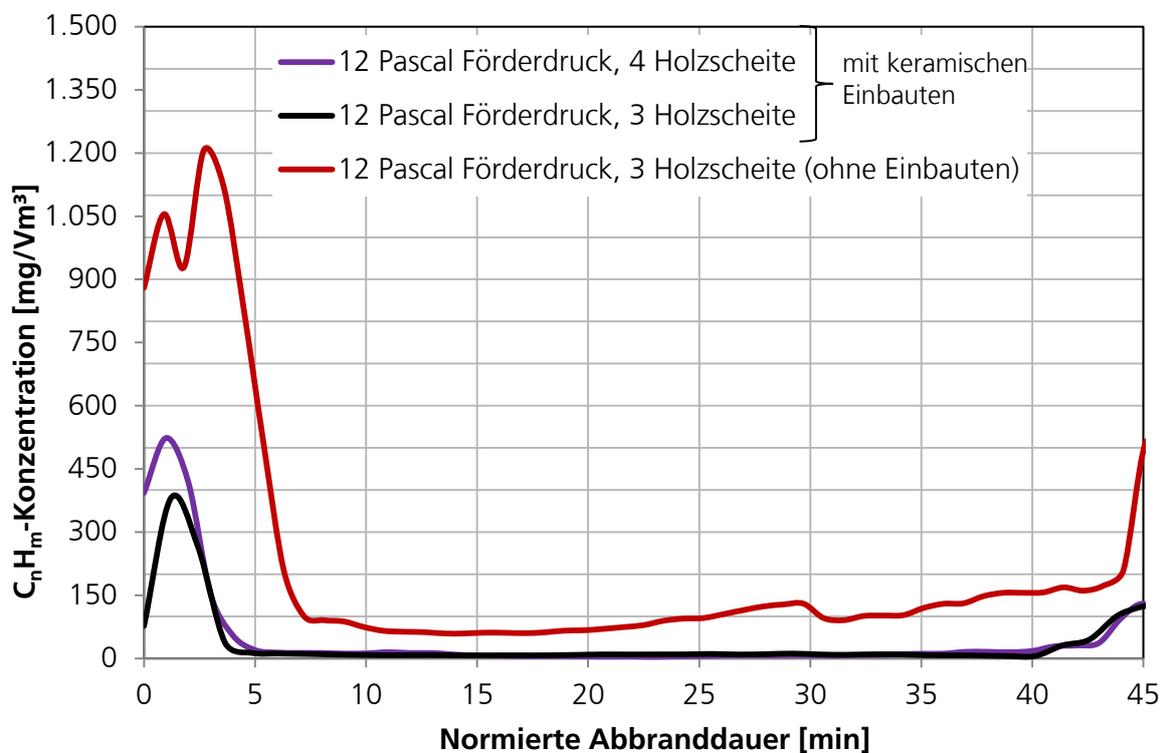


Diagramm 25: Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit keramischen Einbauten mit drei und vier Scheiten.

Mit der Einbautentechnik wurden über den gesamten Betrieb niedrigere Konzentrationen an Gesamtkohlenwasserstoffen (gemessen als Propan mit FID) erreicht. Besonders während der Startbetriebsphase ist zu erkennen, dass die Konzentrationen bei einer Erhöhung der Scheitenanzahl ansteigen. Dieser Anstieg ist auf die intensive Vergasung zu Beginn des Verbrennungsvorgangs zurückzuführen, der bei einer Vergrößerung der Scheitenanzahl bzw. der aktiven Brennstoffoberfläche entsteht. Durch die intensive Durchmischung der Abgase in den Einbauten wird eine bessere Durchmischung des im Abgas enthaltenen Sauerstoffs erreicht, sodass die Oxidation besonders in den Start- und Ausbrandbetriebsphasen verbessert wurde.

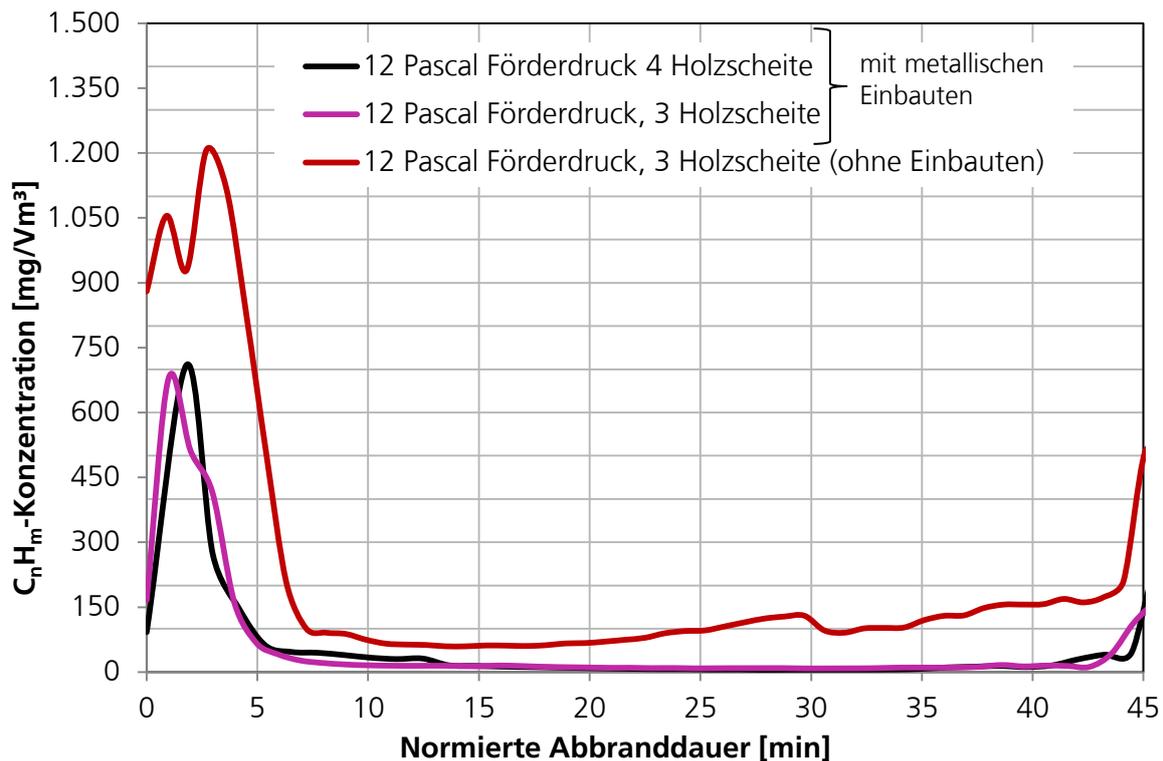


Diagramm 26: Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit metallischen Einbauten mit drei und vier Scheiten.

In Diagramm 26 sind die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb des freistehenden Raumheizers mit und ohne metallische Einbauten, mit drei und vier Scheiten gegenübergestellt. Es ist im Vergleich zum Diagramm 25 zu erkennen, dass mit dem Einsatz der keramischen Einbauten eine bessere Minderung der Gesamtkohlenwasserstoffe vor allem in der Start- und Ausbrandbetriebsphasen erreichen wurde als mit dem Betrieb mit metallischen Einbauten. Das ist auf die höhere Wärmespeicherkapazität sowie die günstige Fähigkeit der keramischen Einbauten zur Speicherung und Bereitstellung der Wärme während der Verbrennung zurückzuführen. Beim Betrieb mit metallischen Einbauten lagen die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe bei der Startbetriebsphase bei ca. 700 mg/Vm³, wobei sie im Mittelwert um etwa 20 % höher sind als beim Betrieb mit keramischen Einbauten aber hingegen um etwa 40% geringer als beim Betrieb ohne Einbauten. Die Minderung der Gesamtkohlenwasserstoffe ist deutlich in der Regelbetriebsphase zu erkennen. Dort schwanken die Konzentrationen zwischen 14 mg/Vm³ und 18 mg/Vm³. Die Wirkung der Einbautentechnik ist außerdem in der Ausbrandbetriebsphase zu bemerken. Hier liegen die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe sowohl mit metallischen als auch mit keramischen Einbauten bei unter 150 mg/Vm³. Ohne die Einbautentechnik steigt die Konzentration der Gesamtkohlenwasserstoffe in der Ausbrandbetriebsphase auf etwa 600 mg/Vm³ an. Im Mittel lagen die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe bei etwa 91 % beim Betrieb mit keramischen Einbauten und bei ca. 90 % mit metallischen Einbauten unterhalb der

Konzentrationen bei dem Betrieb des freistehenden Raumheizers ohne Einbauten.

Variation des Brennstoffs beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Die Art des in einer Verbrennung eingesetzten Brennstoffs ist eine wichtige Einflussgröße für die Qualität der Verbrennung. Die wichtigsten Einflüsse des Brennstoffs auf die Verbrennung sind oben (Variation des Brennstoffs, S. 100) ausführlich erläutert. Im Diagramm 27 und Diagramm 28 sind die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe während der Verbrennung von Fichten- und Buchenholz ohne sowie mit keramischen bzw. metallischen Einbauten dargestellt.

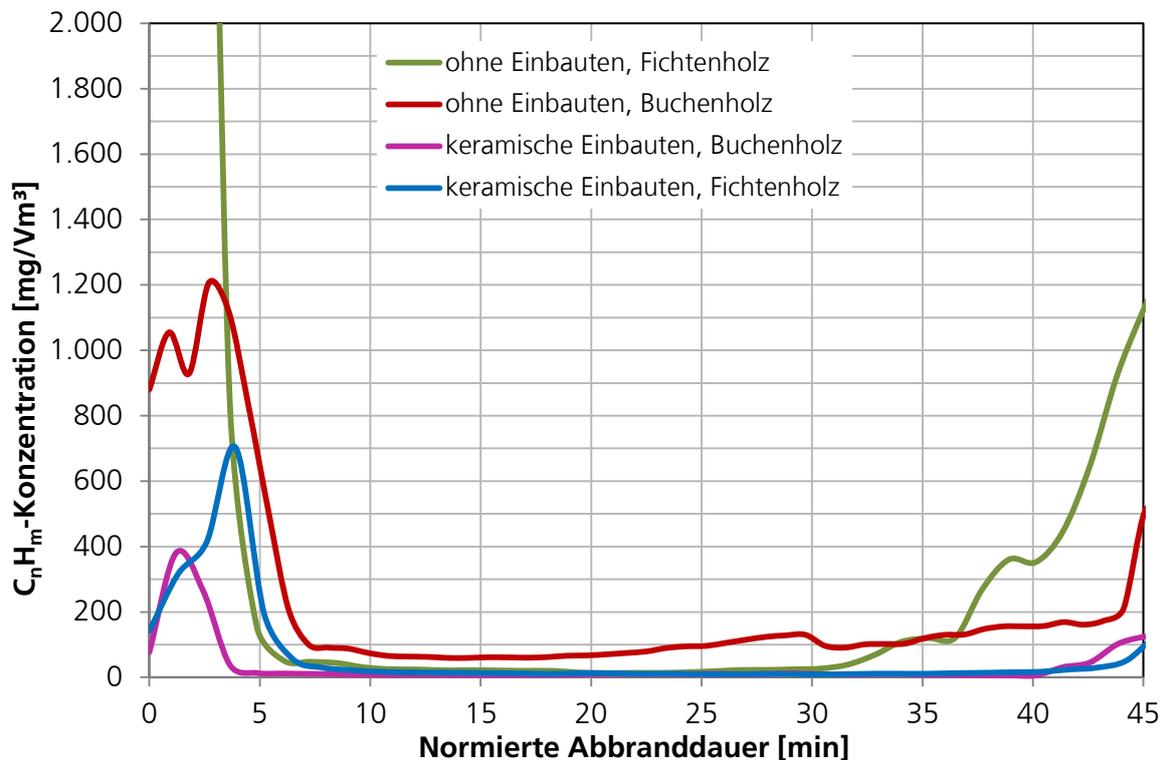


Diagramm 27: Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit keramischen Einbauten bei der Verbrennung von Fichten- und Buchenholz.

Dem Diagramm 27 sowie dem Diagramm 28 ist zu entnehmen, dass die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbautentechnik bei der Verbrennung von Fichtenholz deutlich höher sind als bei der Verbrennung von Buchenholz. Dabei steigen die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe in der Startbetriebsphase auf über 1.500 mg/Vm^3 an, wohingegen sie bei der Verbrennung vom Buchenholz bei etwa 1.200 mg/Vm^3 liegen. Sowohl mit keramischen Einbauten, als auch mit metallischen Einbauten konnte das Emissionsverhalten sowohl beim Einsatz von Buchen- als auch von Fichtenholz verbessert werden. Beim Einsatz der

keramischen Einbauten und bei der Verbrennung von Fichtenholz werden die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe in der Startbetriebsphase auf etwa 700 mg/Vm³ reduziert. Eine effektivere Reduzierung in dieser Phase wurde bei der Verbrennung vom Buchenholz erreicht, bei der die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe bei etwa 400 mg/Vm³ lagen.

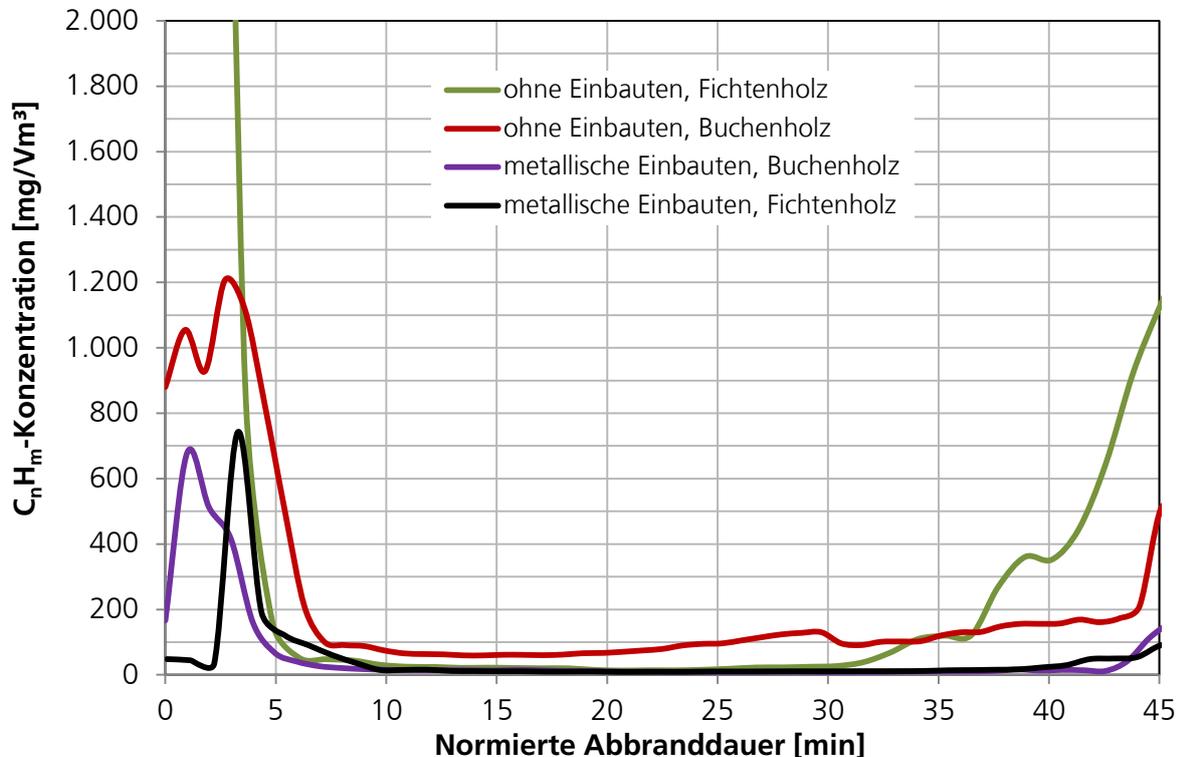


Diagramm 28: Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des freistehenden Raumheizers ohne und mit metallischen Einbauten bei der Verbrennung von Fichten- und Buchenholz.

In den Regelbetriebsphasen schwanken die Konzentrationen bei der Verbrennung von Buchenholz ohne Einbauten zwischen 60 mg/Vm³ und 150 mg/Vm³. Während der Verbrennung von Fichtenholz liegen die Konzentrationen zwischen 18 mg/Vm³ und 30 mg/Vm³. Beim Einsatz von metallischen und keramischen Einbauten im freistehenden Raumheizer wurden, unabhängig vom eingesetzten Brennstoff und der eingesetzten Einbautentechnik, stabile Emissionsbedingungen erreicht. Dabei liegen die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe zwischen 8 mg/Vm³ und 24 mg/Vm³.

In der Ausbrandbetriebsphase steigen die Konzentrationen während des Betriebs des freistehenden Raumheizers mit Fichtenholz ohne die Einbautentechnik deutlich früher und stärker an als bei der Verbrennung von Buchenholz. Nach der 30. Minute steigt die Konzentration ohne Einbauten bis zum Ende der Verbrennung von Fichtenholz auf etwa 1.100 mg/Vm³. Bei den Versuchen mit Einbautentechnik beginnt die Ausbrandbetriebsphase erst nach der 40. Minute. Dabei liegen die Konzentrationen in der Ausbrandbetriebsphase unabhängig vom eingesetzten Brennstoff und sowohl

mit metallischen als auch mit keramischen Einbauten bei unter 200 mg/Vm³. Im Mittel wurde bei der Verbrennung von Fichtenholz mit metallischen Einbauten ein Minderungsgrad von 70 % erreicht. Beim Einsatz von keramischen Einbauten beträgt der mittlere Minderungsgrad für die Gesamtkohlenwasserstoffe ca. 83 %.

Minderung gefährlicher Kohlenwasserstoffverbindungen

Die Messung der Konzentrationen von den Gesamtkohlenwasserstoffen erfolgt üblicherweise über einen Flammenionisationsdetektor. Problematisch ist in diesem Zusammenhang, dass bei diesem Messverfahren einige Verbindungen entweder nur schwer oder gar nicht erfasst werden können (siehe Untersuchung zu Gesamtkohlenwasserstoffen, S. 102).

Tabelle 10: Reduktionsgrade gefährlicher Kohlenwasserstoffverbindungen gemessen mit einem FTIR-Abgasanalysator der Firma ANSYCO Analytische Systeme und Componenten GmbH bei Einsatz von keramischen Einbauten im freistehenden Raumheizer.

KW-Verbindung	Summenformel	ohne Einbauten	mit Einbauten	Reduktionsgrad
		[ppm]	[ppm]	[%]
Methan	CH ₄	108,6	51,2	52,9
Butan-n	C ₄ H ₁₀	2,0	1,5	25,1
Ethen	C ₂ H ₄	22,2	10,7	51,7
Propen	C ₃ H ₆	5,3	1,0	81,6
Acetylen	C ₂ H ₂	4,6	3,4	25,6
Benzol	C ₆ H ₆	11,6	5,8	49,9
Toluol	C ₇ H ₆	0,3	0,2	37,1
Xyclole	C ₈ H ₁₀	2,2	1,0	56,7
Styrol	C ₈ H ₈	1,1	0,8	28,7
Methanol	CH ₄ O	14,1	4,4	68,4
Ethanol	C ₂ H ₆ O	9,0	0,5	94,1
Aceton	C ₃ H ₆ O	8,7	1,9	78,3
Formaldehyd	CH ₂ O	25,2	10,5	58,5
Acetaldehyd	C ₂ H ₄ O	13,7	4,1	70,2
Ameisensäure	CH ₂ O ₂	3,7	1,2	68,8
Essigsäure	C ₂ H ₄ O ₂	31,1	7,1	77,1
Phenol	C ₆ H ₆ O	1,2	0,8	27,8
Kresole	C ₇ H ₈ O	4,4	0,6	86,9
Guajacol	C ₇ H ₈ O ₂	1,5	0,5	64,7
Isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1,7	1,2	28,9

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die Konzentration von 20 verschiedenen gefährlichen Kohlenwasserstoffverbindungen über ein Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR) der Firma ANSYCO Analytische Systeme und Componenten GmbH ermittelt und in der Tabelle 10 mit den jeweiligen Reduktionsgraden beim Einsatz der keramischen Einbauten dargestellt. Der Tabelle 10 ist zu entnehmen, dass der Reduktionsgrad, je nach Kohlenwasserstoffverbindung, zwischen 25,6 % und 94,1 % liegt. Bei den mit dem FID schwer erfassbaren Substanzen, wie Ameisensäure oder

Acetaldehyd, liegt der Abscheidegrad bei über 68 %. Der mittlere Abscheidegrad, berechnet aus allen in Tabelle 10 aufgelisteten Kohlenwasserstoffen beträgt 57 %.

Die toxikologische und ökologische Relevanz für den Einsatz der Einbautentechnik in Einzelraumfeuerungsanlagen ergibt sich aus den erreichten Reduktionen der gefährlichen Kohlenwasserstoffverbindungen, welche in der Tabelle 10 aufgelisteten sind.

6.1.2.4 Zusammenfassung und Auswertung der gasförmiger Emissionen

In der Tabelle 11 sind die Mittelwerte der Konzentration von Kohlenstoffmonoxid und der Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit keramischen sowie metallischen Einbauten bei einer Variation der Betriebsparameter zusammengefasst. Der Tabelle 11 ist zu entnehmen, dass der Grenzwert (1.250 mg/Vm^3) für Kohlenstoffmonoxid gemäß der 1. BImSchV beim Betrieb des freistehenden Raumheizers ohne Einbauten nicht eingehalten werden kann, obwohl er dort unter optimierten Betriebseinstellungen betrieben wurde. Bei der Verbrennung von Buchenholz wurden mittlere Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids von 1.356 mg/Vm^3 bei optimalen Betriebseinstellungen des freistehenden Raumheizers gemessen. Es ist zu betonen, dass beim Betrieb ohne Einbauten die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids und der Gesamtkohlenwasserstoffe bei einer Abweichung der betrieblichen Einstellungen von den optimalen Betriebseinstellungen deutlich über diesem gemessenen mittleren Wert lag. Bei der Verbrennung von Fichte wurde bei gleicher Betriebseinstellung ein Mittelwert für Kohlenstoffmonoxid in Höhe von 1.498 mg/Vm^3 ermittelt. Die mittleren Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe lagen bei der Verbrennung von Buchenholz bei etwa 122 mg/Vm^3 , wobei sie bei der Verbrennung von Fichtenholz bei etwa 136 mg/Vm^3 waren. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass dieser Prototyp beim Betrieb ohne die Einbautentechnik weder eine Emissionsprüfung gemäß DIN EN 13240 bestehen noch einen repräsentativen und wiederholbaren Betrieb gewährleisten kann.

Mit der Einbautentechnik kann der Grenzwert für Kohlenstoffmonoxid, auch bei einer Abweichung zu den optimalen Betriebseinstellungen, problemlos eingehalten werden. Beim Einsatz von metallischen Einbauten liegen die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids, je nach Betriebseinstellungen, zwischen 472 mg/Vm^3 und 820 mg/Vm^3 , wohingegen beim Betrieb mit keramischen Einbauten die Mittelwerte der Konzentrationen für Kohlenstoffmonoxid zwischen 379 mg/Vm^3 und 731 mg/Vm^3 schwanken.

Ähnlich bedeutsame Reduktionsgrade, wie beim Kohlenstoffmonoxid, wurden auch bei den Gesamtkohlenwasserstoffen erzielt. Beim Betrieb mit metallischen Einbauten lag die mittleren Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe, je nach Variation bzw. Betriebseinstellung, zwischen 12 mg/Vm^3 und 48 mg/Vm^3 , wohingegen sie beim Betrieb mit keramischen Einbauten zwischen 16 mg/Vm^3 und 36 mg/Vm^3 schwankten.

Die mittleren Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe wurde auch bei einer Variation der Betriebsparameter folglich soweit reduziert, sodass mit der Einbautentechnik auch zukünftige Grenzwerte, wie z. B. die Grenzwerte der vorläufigen Ökodesign-Richtlinie ab dem Jahr 2022 (120 mg/Vm³), ohne Probleme eingehalten werden können.

Tabelle 11: Mittelwerte der Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid und der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb des freistehenden Raumheizers.

Einsatz der Feuerstätte	Variation	Anzahl der Scheite	Druck [Pa]	Brennstoff	Masse [kg]	CO [mg/Vm ³]	C _n H _m [mg/Vm ³]
ohne Einbauten	Optimale Einstellungen	3	12	Buche	1,8	1.356	122
		3	12	Fichte	1,8	1.498	136
metallische Einbauten	Optimale Einstellungen	3	12	Buche	1,8	791	32
	Förderdruck	3	16	Buche	1,8	710	48
		3	8	Buche	1,8	582	36
	Brennstoff-masse	3	12	Buche	1,4	715	27
		3	12	Buche	2,2	667	47
	Scheiten-anzahl	4	12	Buche	1,8	472	12
Brennstoff	3	12	Fichte	1,8	820	37	
keramische Einbauten	Optimale Einstellungen	3	12	Buche	1,8	379	16
	Förderdruck	3	16	Buche	1,8	606	29
		3	8	Buche	1,8	566	36
	Brennstoff-masse	3	12	Buche	1,4	609	26
		3	12	Buche	2,2	556	24
	Scheiten-anzahl	4	12	Buche	1,8	380	11
Brennstoff	3	12	Fichte	1,8	731	21	

Durch die hohe Flexibilität der Einbautentechnik gegenüber den Variationen betrieblicher Einstellungen können die Grenzwerte nicht nur auf dem Prüfstand, sondern auch von unerfahrenen Anlagenbetreibern im Praxisbetrieb nachhaltig und einfach eingehalten werden.

6.1.2.5 Staubbörmige Emissionen

Bei den staubbörmigen Emissionen ist zwischen dem Gesamtstaub, welcher gravimetrisch zu messen ist, und Feinstäuben, die bisher nur anhand der Staubzählverfahren zu erfassen sind, zu unterscheiden. Es ist zu erwähnen, dass sich die gemäß der 1. BImSchV geforderten Staubgrenzwerte nur auf die gravimetrische Messmethode als Gesamtstaub beziehen. Staubzählverfahren werden bisher für die Messung gemäß der 1. BImSchV nicht verwendet. In dieser Arbeit werden beide Staubmessverfahren für die Bewertung der Abscheideleistung bzw. des Reduzierungsgrads von Staubpartikeln durch die Verwendung der Einbautentechnik eingesetzt.

Bewertung des Gesamtstaubs anhand gravimetrischer Messung

Das gravimetrische Verfahren zur Messung von Stäuben erfolgt gemäß VDI 2066. Hierzu wird über einen Zeitraum von 30 Minuten ein Abgasvolumenstrom von 270 l entnommen. In Abschnitt 5.1.2 ist dieses Messverfahren detailliert erläutert. Gemäß der 1. BImSchV darf während der Emissionsprüfung von einem freistehenden Raumheizer gemäß DIN EN 13240 ein Grenzwert in Höhe von 40 mg/Vm³ nicht überschritten werden.

In der Tabelle 12 sind die Staubkonzentrationen im Abgas unter optimierten Prüfbedingungen ohne Einbauten, und bei einer Variation der Betriebsparameter mit metallischen und keramischen Einbauten dargestellt. Der Grenzwert von 40 mg/Vm³ für freistehende Raumheizer konnte auch ohne die integrierte Einbautentechnik eingehalten werden. Durch die Verwendung der Einbautentechnik wurde die Staubkonzentration im Nennwärmeleistungsbetrieb von 32 mg/Vm³ (mit Schaumkeramikplatten) auf 17 mg/Vm³ (metallische Einbauten) bzw. 11 mg/Vm³ (keramische Einbauten) gesenkt.

Tabelle 12: Ergebnisse aus der gravimetrischen Staubmessung während der Versuchsreihen mit dem freistehenden Raumheizer.

Feuerstätte	Einsatz der Feuerstätte	Variation	Anzahl der Scheite	Druck [Pa]	Brennstoff	Masse [kg]	Staub [mg/Vm ³]
freistehender Raumheizer nach DIN EN 13240	Ohne Einbauten	Optimale Einstellungen	3	12	Buche	1,8	32 - 68
			3	12	Fichte	1,8	46 - 120
	Mit metallischen Einbauten	Optimale Einstellungen	3	12	Buche	1,8	17
			Förderdruck	3	16	Buche	1,8
		Brennstoffmasse		3	8	Buche	1,8
			3	12	Buche	1,4	12
			3	12	Buche	2,2	16
		Scheitenanzahl	4	12	Buche	1,8	18
		Brennstoff	3	12	Fichte	1,8	17
	Mit keramischen Einbauten	Optimale Einstellungen	3	12	Buche	1,8	11
			Förderdruck	3	16	Buche	1,8
		Brennstoffmasse		3	8	Buche	1,8
			3	12	Buche	1,4	16
			3	12	Buche	2,2	16
		Scheitenanzahl	4	12	Buche	1,8	20
	Brennstoff	3	12	Fichte	1,8	21	

Bei einer Erhöhung des Abgasförderdrucks vergrößert sich der Abgasvolumenstrom und es werden mehr Staubpartikel mit dem Abgasstrom in die Abgasanlage mitgerissen. Durch die Filter-Reaktorwirkung der Einbautentechnik liegen die Staubkonzentrationen auch bei höheren

Abgasförderdrücken (16 Pa) unabhängig von der verfügbaren Einbautentechnik $\leq 20 \text{ mg/Nm}^3$. Wird die Feuerungsanlage mit geringeren Brennstoffmassen beschickt, ist durch die Änderung des Verhältnisses von Luft- und Brennstoffzufuhr mit höheren Staubkonzentrationen in der Startphase zu rechnen. Mit der Einbautentechnik kann die Staubkonzentration auch bei einer Variation der Brennstoffmasse (1,4 kg und 2,2 kg) stabil zwischen 12 mg/Nm^3 und 16 mg/Nm^3 gehalten werden. Wird der Raumheizer nicht mit drei Scheiten, sondern mit vier Holzscheiten beschickt, ist die Vergasung bei einer unveränderten Verbrennungslufteinstellung durch die größere Brennstoffoberfläche intensiver und die Staubkonzentration nimmt zu.

Die Staubkonzentration ist folglich bei einer Vergrößerung der Brennstoffoberfläche höher als bei einer Variation anderer Verbrennungsparameter. Der nach der 1. BImSchV geforderte Grenzwert für Stäube von 40 mg/Nm^3 wurde in keiner Versuchsreihe überschritten. Die Einbautentechnik zeigt bezüglich einer Variation der wichtigsten Verbrennungsparameter eine sehr hohe Stabilität, sodass die Grenzwerte der 1. BImSchV fast unabhängig vom Betreiberverhalten und mit jeder Auflage eingehalten wurde.

Bewertung des Feinststaubs (5 nm bis 350 nm) anhand des Staubzählverfahrens

Durch die gravimetrische Staubmessung lassen sich Feinstäube größer als $0,7 \mu\text{m}$ gut erfassen. Feinstäube kleiner als $1 \mu\text{m}$ bzw. im Nanometerbereich lassen sich mechanisch durch Filterung und somit gravimetrisch nur zum geringen Teil erfassen. Diese Stäube ($< 1 \mu\text{m}$) machen über 90 % der Gesamtstaubemissionen aus und lassen sich nur thermisch oder katalytisch durch Oxidation behandeln bzw. reduzieren. Die gesamte Abscheideleistung der thermischen Verfahren, wie z. B. die Einbautentechnik, ergibt sich aus der Minderung beider Staubfraktionen bzw. aus den Fraktionen kleiner als $1 \mu\text{m}$, erfasst durch Zählverfahren, sowie größer als $1 \mu\text{m}$, gemessen durch gravimetrische Verfahren. Thermische Technologien wie die Einbautentechnik, tragen mehr zur Staubminderung durch Oxidation als durch die mechanische Abscheidung (wie z. B. Sedimentation Filtration) bei. Die Feinstäube im Nanometerbereich, die sich wie Gase verhalten, werden bei der Durchströmung durch das Einbautenmodul thermisch zersetzt und folglich gemindert.

Im Rahmen dieses Projekts wurde durch den Einsatz der Einbautentechnik eine bedeutsame Minderung der Feinstäube aufgrund der Verbesserung der Oxidationsbedingungen erreicht. Im Diagramm 30 sind die Verteilungen der Partikelanzahl bei der Verbrennung von Buchenholz im freistehenden Raumheizer ohne Einbauten sowie mit metallischen und keramischen Einbauten dargestellt. Eine kontinuierliche und reproduzierbare Zählung der Feinstäube wurde durch den Einsatz eines speziellen Verdünnungstunnels mit dem SMPS-Spektrometer (Scanning Mobility Particle Sizer) der Firma GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG realisiert (Abschnitt 5.1.3).

Aus dem Diagramm 29 ist es ersichtlich, dass sowohl durch den Einsatz der keramischen Einbauten als auch durch den Einsatz der metallischen Einbauten ein hoher Minderungsgrad der Feinststäube im Größenbereich zwischen 5 nm und 350 nm erzielt wurde. Mit den keramischen Einbauten wurde bei einer kontinuierlichen Staubmessung (mehr als 6 Betriebsstunden) ein Minderungsgrad von Feinststäuben von 86 % erzielt, wobei beim Einsatz der metallischen Einbauten ein Minderungsgrad von 31 % erreicht wurde.

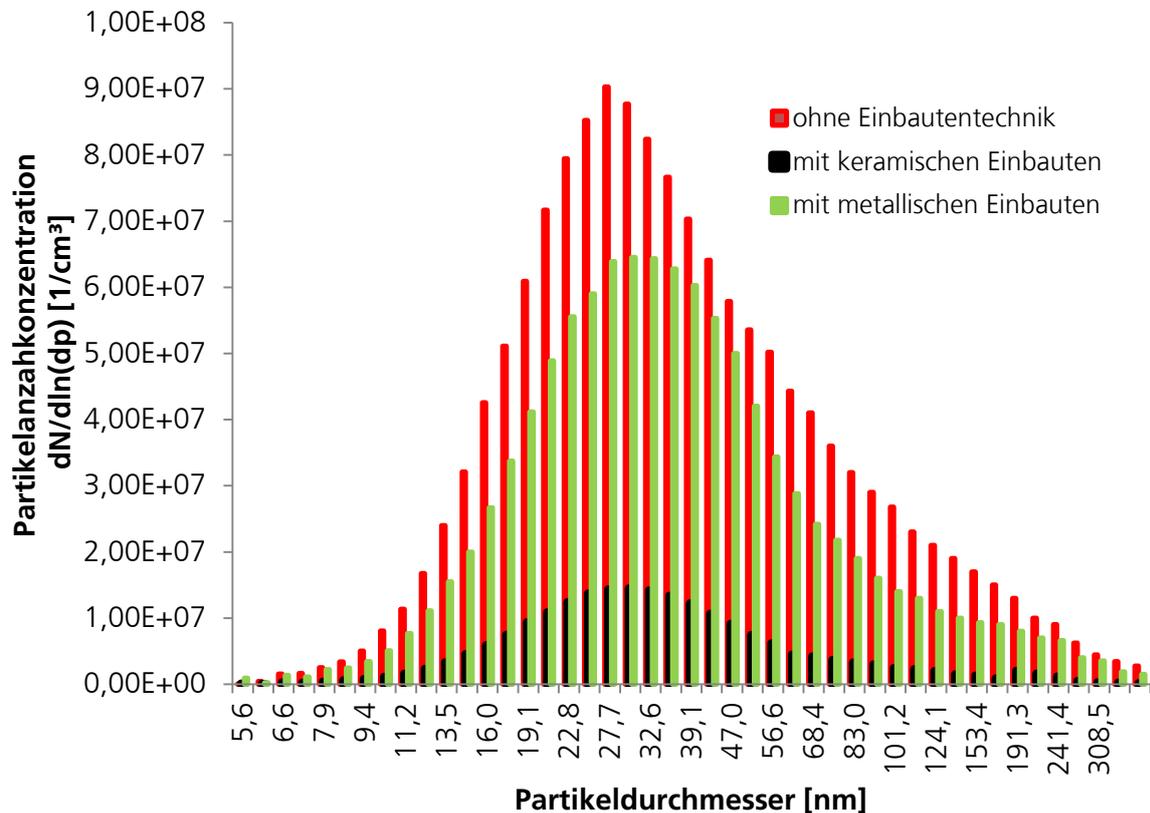


Diagramm 29: Partikelverteilung ohne und mit metallischen (Pall-Ringe 35 mm) sowie keramischen Einbauten (Pall-Ringe 50 mm).

Die bessere Oxidation und Abscheideleistung von keramischen Einbauten gegenüber metallischen Einbauten wurde auch bezüglich der nicht verbrannten gasförmigen Bestandteile Kohlenstoffmonoxid und Gesamtkohlenwasserstoffe (Abschnitt 6.1.2.3) beobachtet. Dies lässt sich auf die für diesen Anwendungsfall besser geeigneten Materialeigenschaften der Keramik im Vergleich zu Metallen zurückführen.

6.1.2.6 Untersuchung zur Verbrennungseffizienz/Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Feuerstätte gibt direkten Aufschluss über die Energiemenge, die zur Erwärmung des Aufstellraums während des Betriebs genutzt werden kann. Hierzu werden die bei der Verbrennung auftretenden Verluste von der zugeführten Wärmeleistung subtrahiert und anschließend auf die in dem Brennstoff enthaltene Energie bezogen. Folgende Verluste (Abgasverluste durch freie Wärme, Verluste durch nicht verbrannte Gase und Verlust durch Brennbare) werden für die Berechnung des Wirkungsgrads

berücksichtigt. Gemäß der 1. BImSchV muss ein freistehender Raumheizer gemäß DIN EN 13240 während der Emissionsprüfung einen Mindestwirkungsgrad von 73 % erreichen können.

In der Tabelle 13 sind die mittleren Wirkungsgrade beim Betrieb des freistehenden Raumheizers bei optimalen Betriebseinstellungen ohne und mit Einbautentechnik und bei einer Variation von betrieblichen Parametern dargestellt. Der Tabelle 13 ist zu entnehmen, dass der Wirkungsgrad ohne Einbauten unter optimalen Betriebseinstellungen bei etwa 75,3 % liegt. Der freistehende Raumheizer kann den derzeit gesetzlich geforderten Mindestwirkungsgrad folglich auch ohne die Einbautentechnik einhalten.

Tabelle 13: Mittlere Wirkungsgrade beim Betrieb des freistehenden Raumheizers mit und ohne Einbautentechnik.

Feuerstätte	Einsatz der Feuerstätte	Variation	Anzahl der Scheite	Druck [Pa]	Brennstoff	Masse [kg]	Wirkungsgrad [%]
freistehender Raumheizer nach DIN EN 13240	ohne Einbauten	Optimale Einstellungen	3	12	Buche	1,8	75,3
			3	12	Fichte	1,8	72,0
	metallische Einbauten	Optimale Einstellungen	3	12	Buche	1,8	80,2
			3	16	Buche	1,8	78,8
		Förderdruck	3	8	Buche	1,8	79,7
			3	12	Buche	1,4	79,6
		Brennstoffmasse	3	12	Buche	2,2	79,8
			4	12	Buche	1,8	80,3
		Brennstoff	3	12	Fichte	1,8	80,3
	keramische Einbauten	Optimale Einstellungen	3	12	Buche	1,8	80,9
			3	16	Buche	1,8	80,5
		Förderdruck	3	8	Buche	1,8	81,5
			3	12	Buche	1,4	80,7
		Brennstoffmasse	3	12	Buche	2,2	80,0
			4	12	Buche	1,8	80,3
	Brennstoff	3	12	Fichte	1,8	80,5	

Mit der Einbautentechnik wurde der Wirkungsgrad erheblich verbessert. Mit metallischen Einbauten lag der Wirkungsgrad bei optimaler Betriebseinstellung bei etwa 80,2 %, wobei mit den keramischen Einbauten ein Wirkungsgrad von 80,9 % erreicht wurde. Eine Variation der Betriebsparameter hat lediglich einen geringfügigen Einfluss auf die Effizienz der Verbrennung. Eine Erhöhung des Wirkungsgrads um zwischen 5 % und 8 % wurde bei allen Betriebsfällen mit Einbautentechnik ohne Problem und reproduzierbar erreicht. Die Erhöhung der Verbrennungseffizienz ergibt sich aus der Stabilisierung der Strömung sowie aus den zusätzlichen Wärmespeichern, wodurch die freigesetzte Wärme besser verwaltet werden

kann. Die Einbautentechnik gewährleistet bei relativ geringer Verbrennungsluftmenge aufgrund der verbesserten Durchmischung eine bessere Verbrennungsqualität. Dadurch sinken die Abgasverluste ab und steigt der Wirkungsgrad entsprechend an.

6.2 Experimentelle Untersuchungen zur Speicherfeuerstätte gemäß DIN EN 15250 mit und ohne Einbauten

Der Prototyp der Speicherfeuerstätte wurde vor der Untersuchung mit der Einbautentechnik hinsichtlich des günstigsten Beschickungsregimes (3 Scheite mit einer Länge von 20 cm und einer Masse von 1,5 kg) optimiert. Dabei wurde festgestellt, dass ohne den Einsatz der Einbautentechnik kein sachgemäßer Betrieb erreicht werden konnte, mit dem die gesetzlichen Grenzwerte der 1. BImSchV eingehalten wurden. Die vielen Versuche, die zur Optimierung der Verbrennung ohne den Einsatz der Einbautentechnik durchgeführt wurden, sind in diesem Forschungsbericht nicht ausführlich erläutert. Die hier beschriebenen Versuchsreihen ohne den Einsatz der Einbautentechnik beziehen sich ausschließlich auf den bereits optimierten Zustand der Speicherfeuerstätte.

6.2.1 Versuchsplan, Speicherfeuerstätte gemäß DIN EN 15250

In Tabelle 14 ist das Versuchsprogramm zur Untersuchung der Einbautentechnik in der Speicherfeuerstätte mit metallischen und keramischen Einbauten dargestellt. Die Variation von Abgasförderdruck, Brennstoffmasse und Scheitenanzahl wurde nur während des Betriebs mit der Einbautentechnik vorgenommen.

Bei den Untersuchungen der Einbautentechnik wurde die Speicherfeuerstätte unter Berücksichtigung der DIN EN 15250 betrieben. Im Abschnitt 5.2.2 ist der Betrieb gemäß der DIN EN 15250 ausführlich erläutert. Der Hauptunterschied zwischen dem Betrieb von Speicherfeuerstätten zu freistehenden Raumheizern ist, dass die Speicherfeuerstätten nur mit einer bestimmten Holzmenge bzw. maximalen Anzahl von fünf Auflagen betrieben werden sollten. Diese maximale Holzmenge ergibt sich aus der zur Wärmespeicherung verfügbaren Speichermasse der Feuerstätte. Wird die Speicherfeuerstätte mit mehr Brennstoff beschickt als vom Hersteller vorgegeben bzw. empfohlen ist, sinkt der Wirkungsgrad aufgrund der erhöhten Abgasverluste drastisch ab. Außerdem werden die Speicherfeuerstätten im Praxisbetrieb bei sichtbarer Flamme bzw. bevor das Feuer ausgeht beschickt. Dieses Vorgehen ist auch gemäß der DIN EN 15250 zulässig.

Tabelle 14: Vorversuchsprogramm mit und ohne zusätzliche Einbauten beim Betrieb der Speicherfeuerstätte.

Versuchsprogramm mit Einzelraumfeuerungsanlagen					
Feuerstätte	Einsatz der Feuerstätte	Variation	Anzahl der Scheite	Druck [pa]	Masse [kg]
Speicher- feuerstätte nach DIN EN 15250	Ohne ⁽¹⁾ Einbauten	Optimale ⁽²⁾ Betriebseinstellung	3	12	1,5
	metallische Einbauten	Optimale ⁽²⁾ Betriebseinstellung	3	12	1,5
		Förderdruck	3	16	1,5
			3	8	1,5
		Brennstoffmasse	3	12	2,5
		Scheitholzanzahl	4	12	1,5
			2	12	1,5
	keramische Einbauten	Optimale Betriebseinstellung	3	12	1,5
		Förderdruck	3	16	1,5
			3	8	1,5
		Brennstoffmasse	3	12	2,5
		Scheitholzanzahl	4	12	1,5
			2	12	1,5

- (1): Als Vergleichsreferenz, die Betriebsverbesserung hinsichtlich der Emissionsminderung und Effizienzerhöhung des Prototyps der Speicherfeuerstätte durch die Integrierung der Einbautentechnik bezieht sich nur auf den Betrieb ohne Einbautentechnik bei den optimalen in der Tabelle 14 erwähnten Einstellungen.
- (2): Optimale Betriebseinstellung: Verbrennungsluftzufuhr zu 100 % geöffnet, Beschickungsregime mit drei Scheiten mit einer Länge von 20 cm und einer Masse von 1,5 kg, Förderdruck von 12 Pascal).

Die größte Herausforderung bei Speicherfeuerstätten ergibt sich dadurch, dass die Innenwände des Feuerraums Wärme speichern und während des Betriebs in den Feuerraum abstrahlen. Aus diesem Grund findet eine unkontrollierte Verbrennung aufgrund der intensiven Vergasung der Brennstoffmasse bzw. des starken Sauerstoffverbrauchs in den ersten 5 Minuten unabhängig von der Beschickungsqualität statt. Dieses Problem nimmt mit zunehmender Anzahl der beschickten Auflagen zu und ist bei dem Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne und mit Einbauten festzustellen.

6.2.2 Untersuchungsergebnisse der Speicherfeuerstätte gemäß DIN EN 15250

Im folgenden Abschnitt sind die Versuchsergebnisse aus den Experimenten mit dem Prototyp der Speicherfeuerstätte dargestellt und erläutert. Die während der Untersuchung variierten Parameter der Verbrennung sind in Tabelle 14 gezeigt.

6.2.2.1 Gasförmige Emissionen

Gemäß der 1. BImSchV ist für die Prüfung von gasförmigen Emissionen in Speicherfeuerstätten nur ein Grenzwert für Kohlenstoffmonoxid einzuhalten. Während dieser Versuchsreihen wurden zusätzlich die Konzentrationen von Stickstoffoxiden (NO_x) und Gesamtkohlenwasserstoffen (gemessen als Propan mit FID) ermittelt. Stickstoffoxide gewinnen zunehmend an Bedeutung im Bereich der Verbrennung von festen Brennstoffen in Kleinf Feuerungsanlagen der 1. BImSchV. In Einzelraumfeuerungsanlagen spielen die NO_x -Emissionen bisher nur eine untergeordnete Rolle.

Untersuchungen zum Kohlenstoffmonoxid/Speicherfeuerstätte gemäß DIN EN 15250

Kohlenstoffmonoxid ist ein hoch reaktives Abgas, welches bei unvollständiger Verbrennung gebildet und entsprechend als Indikator für die Vollständigkeit bzw. Qualität der Verbrennung verwendet wird. Im Diagramm 30 sind die Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs der Speicherfeuerstätte ohne und mit keramischen sowie mit metallischen Einbauten dargestellt. Dem Diagramm 30 ist zu entnehmen, dass die Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid mit der Einbautentechnik in jeder Phase des Betriebs geringer sind als beim Betrieb ohne die Einbautentechnik. Außerdem ist ersichtlich, dass mit den keramischen Einbauten geringere Konzentrationen erreicht werden als mit metallischen Einbauten.

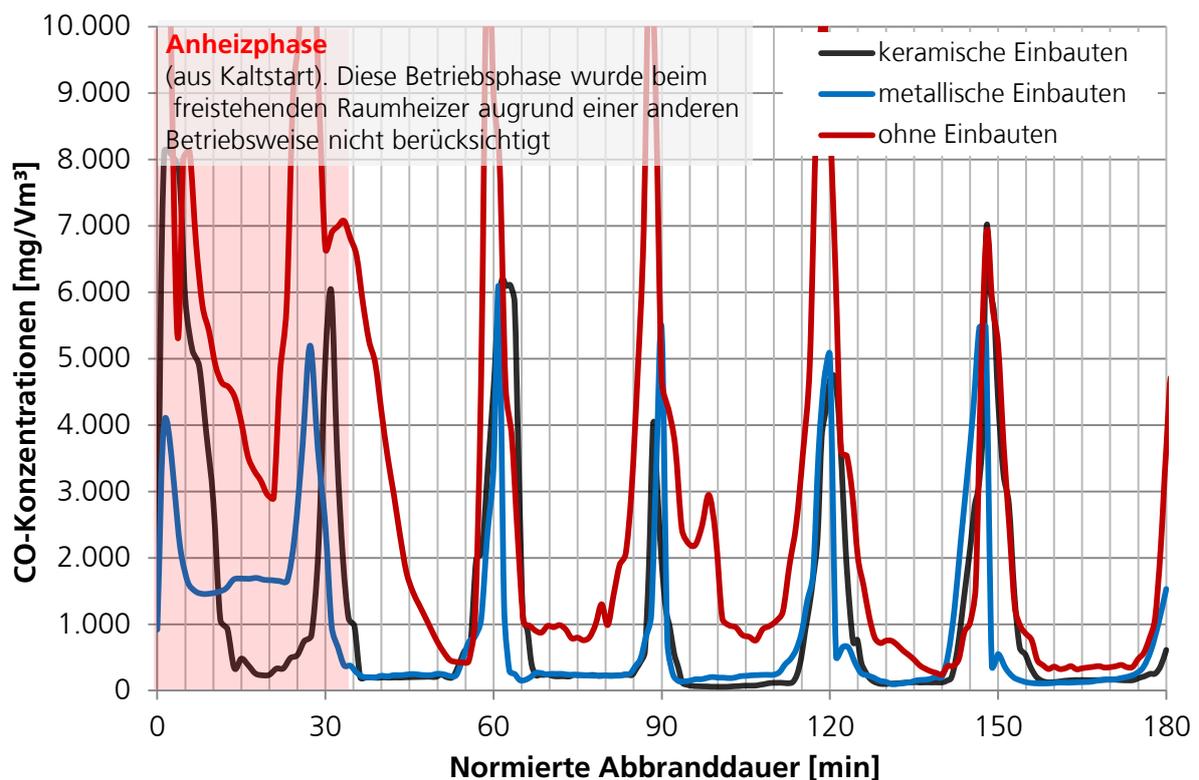


Diagramm 30: Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs ohne und mit metallischen und keramischen Einbauten.

Im Diagramm 30 ist außerdem ersichtlich, dass die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids in den ersten 30 Betriebsminuten bzw. in der

Anheizphase (aus Kaltstart) der Speicherfeuerstätte bei niedrigen Temperaturen bis über 10.000 mg/Vm³ ansteigen. Beim Betrieb der Speicherfeuerstätte mit keramischen Einbauten wurden die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid auf ca. 8.000 mg/Vm³ in dieser Anheizphase reduziert, wobei diese beim Betrieb mit metallischen Einbauten bei ca. 4.100 mg/Vm³ lagen. Diese Wirkung lässt sich auf die schnellere Wärmespeicherung und Bereitstellung von Metall im Vergleich zu Keramik zurückführen. Dadurch können die metallischen Einbauten innerhalb kürzester Zeit Energie speichern, die sie anschließend zur Verbesserung der Oxidation wieder bereitstellen. Ein weiterer Grund für die geringere Spitze der Konzentration können katalytische Effekte sein, die beim Einsatz von metallischen Einbauten neben der reinen thermischen Wirkung zutragen kommen, jedoch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht separat bewertet werden. Zwar sind die Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid beim Betrieb mit keramischen Einbauten durch die langsamere Wärmespeicherung in den ersten 15 Minuten höher als bei den metallischen Einbauten, jedoch sinken diese Konzentrationen auf unter 300 mg/Vm³ ab, sobald die keramischen Einbauten geeignete Temperaturen (über 600 °C) erreicht haben ab, wobei diese mit metallischen Einbauten bei ca. 1.700 mg/Vm³ bis zum Ende der Auflage bleiben.

Nach der Anheizphase bzw. ab der ersten Auflage ist der Effekt der Einbautentechnik deutlich zu erkennen. Beim regulären Betrieb der Speicherfeuerstätte und in der Anfahrbetriebsphase (direkt nach dem Auflegen der Holzscheite) steigen die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids ohne Einbautentechnik unkontrolliert auf über 10.000 mg/Vm³ an. Diese Konzentrationen werden mit dem Einsatz der metallischen Einbauten auf bis zu 5.500 mg/Vm³ sowie beim Einsatz von keramischen Einbauten auf bis zu 4.200 mg/Vm³ reduziert. In der Regelbetriebsphase wurden mit der Einbautentechnik deutlich geringere Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid ermittelt als beim Betrieb ohne Einbautentechnik. Dabei wurden mit keramischen und metallischen Einbauten ähnlich niedrige Konzentrationen zwischen ca. 100 mg/Vm³ und 200 mg/Vm³ erreicht. Ohne die Einbautentechnik schwanken die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids zwischen 400 mg/Vm³ und 1.000 mg/Vm³. Im Diagramm 30 ist außerdem zu sehen, dass die Verbrennung in der Regelbetriebsphase mit den keramischen Einbauten stabiler ist und länger andauert als mit den metallischen Einbauten. Während die Regelbetriebsphase mit den keramischen Einbauten etwa bis zur 25. Minute der Auflage andauert, so endet diese beim Einsatz metallischer Einbauten bereits nach etwa 20 Minuten. Das ist auf die höhere Wärmespeicherfähigkeit keramischer Einbauten im Vergleich zu metallischen Einbauten zurückzuführen, wobei die keramischen Einbauten die gespeicherte Wärme über einen längeren Zeitraum abgeben und für die Oxidation nicht verbrannter Bestandteile bereitstellen können.

Ähnlich wie bei den Versuchsreihen mit der Einbautentechnik in dem freistehenden Raumheizer im Abschnitt 6.1.2.3 wurden auch hier durch den

Einsatz der Einbautentechnik geringere Konzentrationen nicht verbrannter Bestandteile ermittelt, wobei mit den keramischen Einbauten niedrigere Konzentrationen erzielt wurden als mit den metallischen Einbauten. Dem Diagramm 31 ist zu entnehmen, dass die Einbautentechnik nach der Anheizphase eine bedeutsame Reduzierung des Kohlenstoffmonoxids gezeigt hat. Im Mittel zeigen die metallischen Einbauten einen Minderungsgrad von 59 %, wobei der Minderungsgrad bei keramischen Einbauten um 11 % besser war und somit bei 70 % lag.

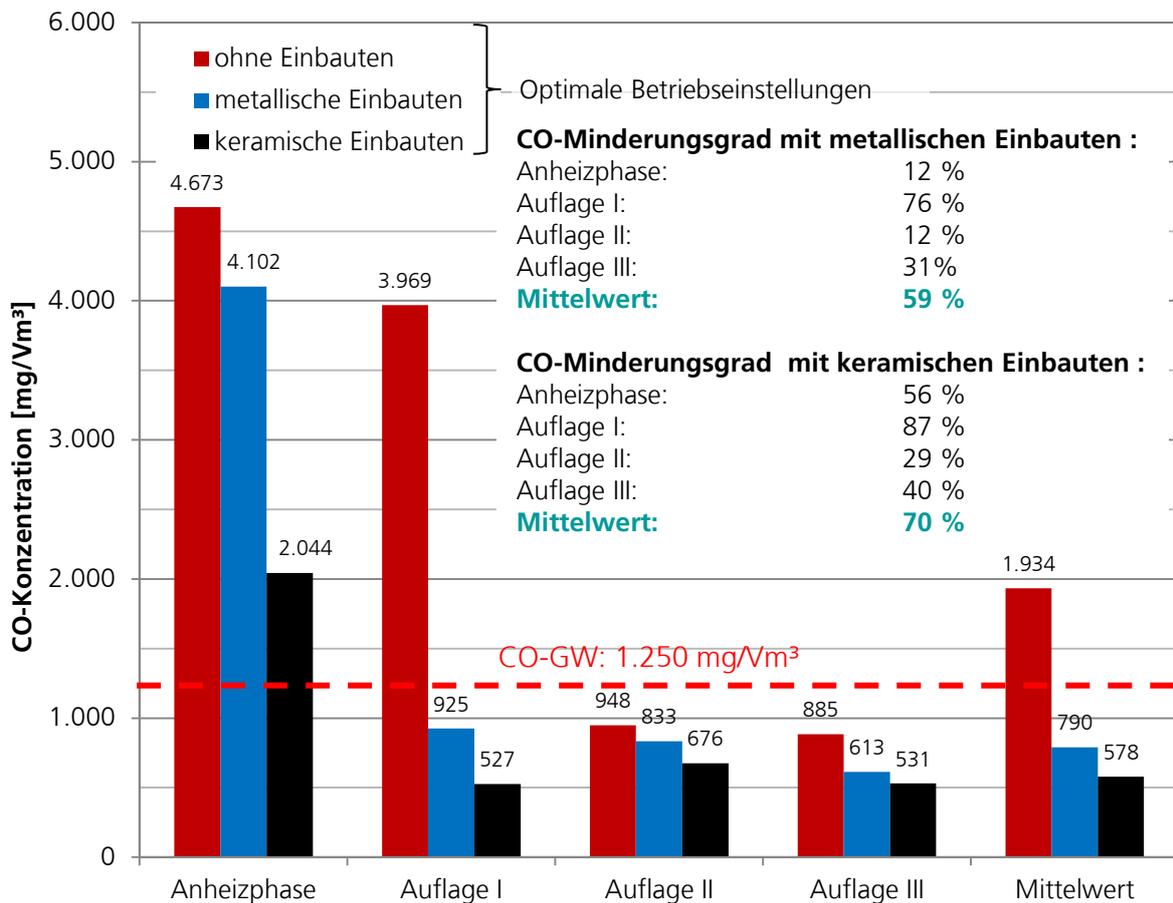


Diagramm 31: Kohlenstoffmonoxid ohne sowie mit Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen.

Der Vorteil der Einbautentechnik beim Einsatz in Speicherfeuerstätten ergibt sich wie beim Betrieb von freistehenden Raumheizern aus der hohen Flexibilität gegenüber der Änderungen der Betriebsparameter wie z. B. Abgasförderdruck, Beschickungsregime. Die Variationen der Betriebsparameter wurden beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ausführlich untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Variation des Abgasförderdrucks beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Der Abgasförderdruck hat einen großen Einfluss auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten in Einzelraumfeuerungsanlagen. Eine detaillierte Beschreibung der Wirkung einer Variation des Abgasförderdrucks auf den Verbrennungsvorgang ist in Abschnitt 3.3.2 erläutert.

Im Diagramm 32 sind die Mittelwerte der Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid über mehrere Auflagen und über den gesamten Betrieb ohne Einbauten bei einem Abgasförderdruck von 12 Pascal und mit Einbauten bei einem Abgasförderdruck von 8 Pascal dargestellt. Im Diagramm 32 sind zusätzlich die Reduktionsgrade aufgelistet, die mit den Einbauten im Vergleich zum Betrieb ohne Einbauten unter optimalen Betriebsbedingungen erreicht wurden. Gemäß der Prüfnorm DIN EN 15250 und der Vorgabe des Sachverständigenausschusses darf die Anheizphase nicht für die Bewertung der Verbrennungsqualität bzw. Schadstoffemissionen herangezogen werden.

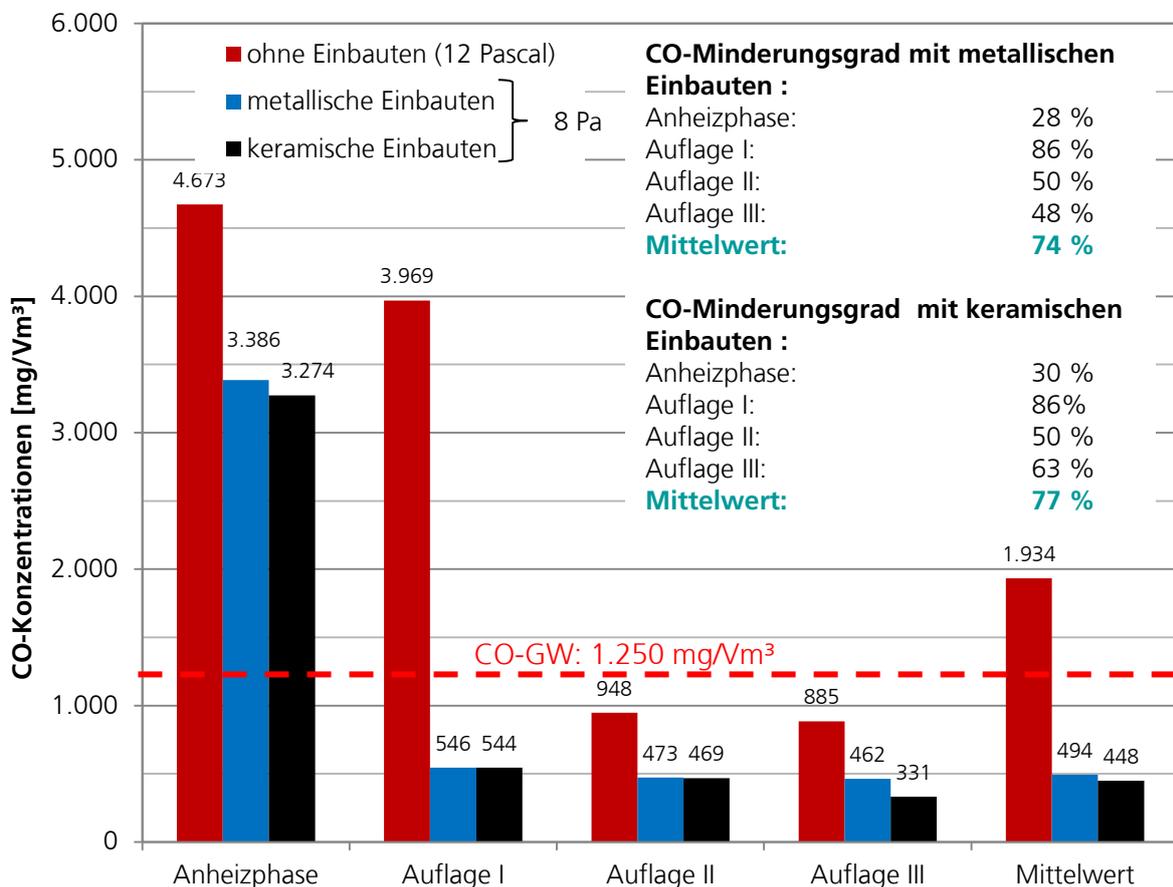


Diagramm 32: Kohlenstoffmonoxid ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei einem Förderdruck von 8 Pascal.

Im Diagramm 32 ist zu ersehen, dass die mittlere Konzentration des Kohlenstoffmonoxids in der Anheizphase am höchsten war, da in dieser Phase noch keine hohen Temperaturen zur vollständigen Oxidation erreicht wurden. Ohne Einbauten lag die Konzentration in der Anheizphase im Mittel bei

4.673 mg/Vm³. Mit metallischen Einbauten wurde die mittlere Konzentration in der Startphase auf 3.386 mg/Vm³ reduziert, wobei mit keramischen Einbauten noch geringere Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid von 3.274 mg/Vm³ erreicht wurden. In den darauf folgenden Auflagen, sind hohe Konzentrationen in der Anfahrbetriebsphase (Betriebsphase nach der Beschickung) damit zu begründen, dass die in den Innenwänden des Feuerraums gespeicherte Wärme eine intensiverer Vergasung und somit unkontrollierter Verbrennung nach dem Auflegen der Holzscheite verursacht. Dabei gerät die Verbrennung kurz (bis zu 8 Minuten) in Sauerstoffmangel (Sauerstoffüberschuss im Abgas < 5 Vol.-%), wodurch hohe Konzentrationen an nicht verbrannten Bestandteilen emittiert bzw. produziert werden.

In den Auflagen nach der Anheizphase lagen die mittleren Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids ohne Einbautentechnik zwischen 3.969 mg/Vm³ und 885 mg/Vm³. Mit metallischen Einbauten wurden die Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid um 50 % bis 86 % sowie mit keramischen Einbauten um 63 % bis 86 % gemindert, obwohl der Abgasförderdruck von 12 Pascal auf 8 Pascal reduziert wurde. Die Minderung des Abgasförderdrucks führt zwar zu einer Verlängerung der Verweilzeit nicht verbrannter Bestandteile in der aktiven Zone, allerdings entsteht dadurch auch ein Sauerstoffmangel, der ohne die Einbautentechnik zu einem hohen Anstieg des Gehalts an Kohlenstoffmonoxid im Abgas der Speicherfeuerstätte führt. Die Einbautentechnik hat in diesem Zusammenhang den Vorteil, dass dank der Verbesserung der Durchmischung eine bessere Oxidation bei relativ geringem Sauerstoffanteil stattfinden kann.

Im Diagramm 33 sind die Mittelwerte des Kohlenstoffmonoxids ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei einem Abgasförderdruck von 16 Pascal dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit den Einbauten und über den gesamten Betrieb niedrigere Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid ermittelt wurden, obwohl die Speicherfeuerstätte beim Einsatz der Einbautentechnik mit einem höheren Förderdruck von 16 Pascal betrieben wurde. Ein erhöhter Abgasförderdruck führt zur Abkühlung der Flamme sowie zur Verringerung der Aufenthaltszeit des Abgases in der aktiven Reaktionszone mit einer entsprechenden Erhöhung der Konzentration der nicht verbrannten Bestandteile. Ohne Einbauten liegen die Konzentrationen in der Anheizphase im Mittel bei 4.673 mg/Vm³. Mit metallischen Einbauten wurden die mittleren Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids in der Startbetriebsphase auf 3.509 mg/Vm³ reduziert, wobei mit keramischen Einbauten noch niedrigere Konzentrationen von 3.403 mg/Vm³ erreicht wurden.

Der Mittelwert des Kohlenstoffmonoxids über die drei Auflagen nach der Anheizphase beträgt ohne Einbauten 1.934 mg/Vm³. Dieser liegt deutlich über den Grenzwert der 1. BImSchV von 1.250 mg/Vm³. Mit der Einbautentechnik kann der Grenzwert auch bei höherem Abgasförderdruck von 16 Pascal einfach eingehalten werden. Dabei wurde Kohlenstoffmonoxid um 70 % beim Betrieb der Speicherfeuerstätte mit metallischen Einbauten

gemindert, wobei beim Betrieb mit keramischen Einbauten ein höherer Minderungsgrad von 76 % erreicht wurde.

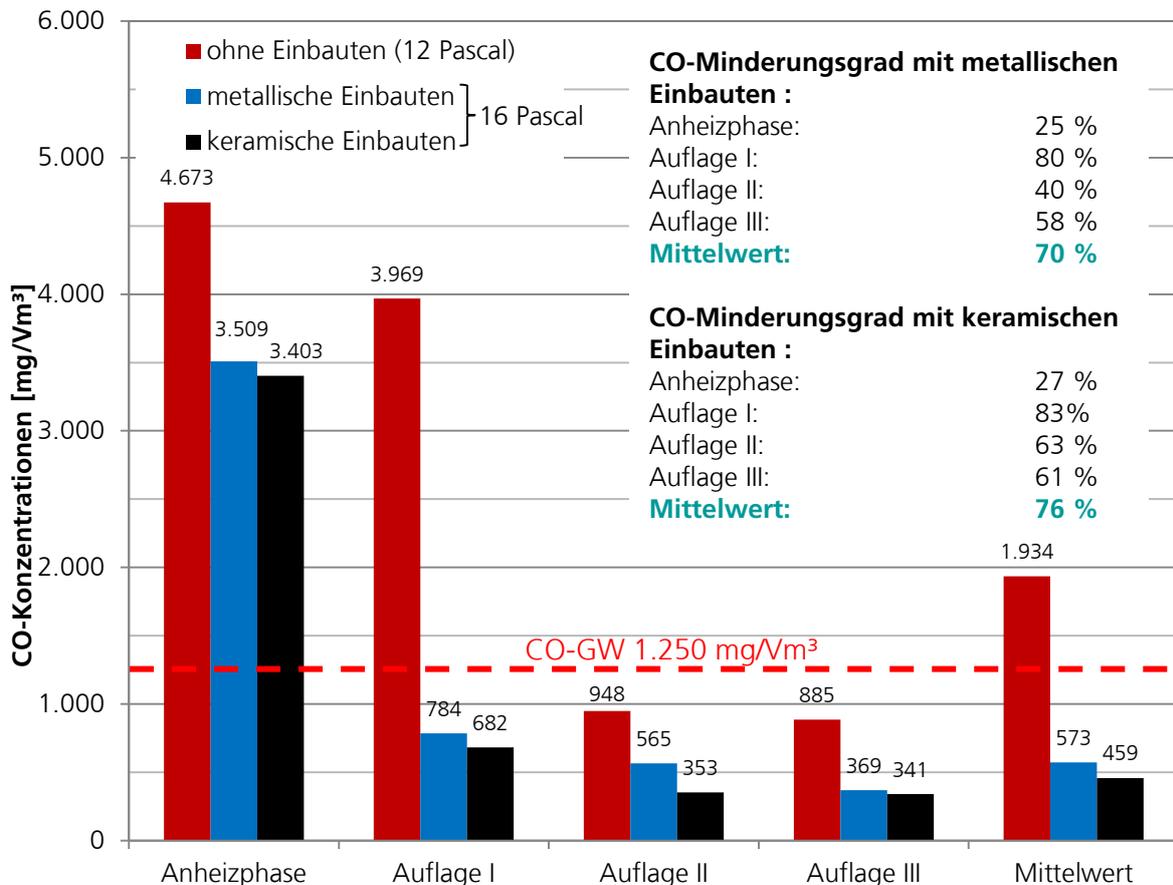


Diagramm 33: Kohlenstoffmonoxid ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei einem Förderdruck von 16 Pascal.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch den Einsatz der Einbautentechnik eine bedeutsame Reduzierung des Kohlenstoffmonoxids unabhängig vom Abgasförderdruck in allen Betriebsphasen erzielt wurde. Die Einbautentechnik verleiht dem Betrieb eine sehr hohe Flexibilität gegenüber der Variation des Abgasförderdrucks.

Variation der Brennstoffmasse beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Die gesamte Brennstoffmasse hängt von der verfügbaren Wärmespeichermasse der Speicherfeuerstätte ab. Gemäß DIN EN 15250 muss die gesamte Brennstoffmasse auf die einzelnen Auflagen aufgeteilt werden. Dabei darf jede einzelne Auflage 20 % der gesamten Brennstoffmasse nicht unterschreiten. Im Rahmen dieses Projekts wurde bei der Untersuchung des Einflusses der Brennstoffmasse auf die Verbrennungsqualität, die Masse von 1,5 kg/Auflage auf 2,5 kg/Auflage erhöht, ohne die Anzahl der Auflagen zu ändern.

Im Diagramm 34 sind die Mittelwerte der Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids in den einzelnen Auflagen und über den gesamten Betrieb unter optimalen Betriebseinstellungen ohne Einbauten mit einer Brennstoffmasse von 1,5 kg/Auflage sowie mit metallischen und keramischen Einbauten bei einer Brennstoffmasse von 2,5 kg/Auflage dargestellt. Eine Verringerung der zugeführten Brennstoffmasse war aus praktischen Gründen nicht zielführend, da die Abbranddauer bei einer weiteren Verringerung der Brennstoffmasse stark reduziert wurde, sodass eine rasche bzw. nicht praxisgerechte Neubeschickung nötig wurde.

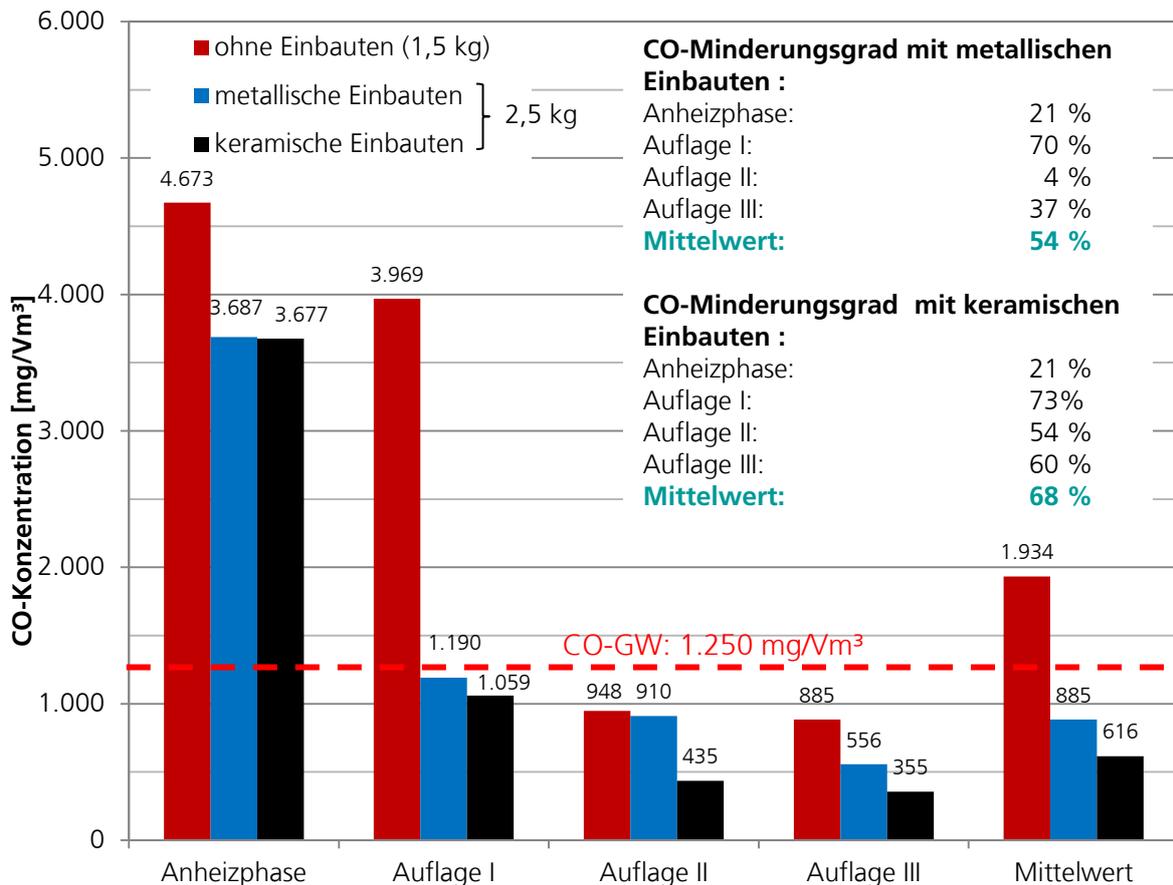


Diagramm 34: Kohlenstoffmonoxid ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei 2,5 kg.

Aus dem Diagramm 34 ist zu ersehen, dass die Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid durch den Einsatz der Einbautentechnik in jeder Auflage niedriger sind als beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne Einbautentechnik. In der Anheizphase liegen die Konzentrationen ohne Einbautentechnik im Mittel bei 4.673 mg/Vm³. Mit der Einbautentechnik können die Konzentrationen auf 3.687 mg/Vm³ bzw. 3.677 mg/Vm³ gesenkt werden. Dies entspricht in beiden Fällen einem Reduktionsgrad von 21 %. In der Anheizphase sind die Konzentrationen mit keramischen und metallischen Einbauten bei einer Beschickung mit einer Brennstoffmasse von 2,5 kg ähnlich. In dieser Phase fehlen die günstigen Temperaturen für eine vollständige Oxidation. In den darauffolgenden Auflagen wird die Wirkung der Einbautentechnik auf die Minderung des Kohlenstoffmonoxids beim

Betrieb der Speicherfeuerstätte besonders deutlich. In der ersten Auflage nach der Anheizphase wurden die höchsten Minderungen des Kohlenstoffmonoxids durch den Einsatz der Einbautentechnik erreicht. Beim Einsatz der keramischen Einbauten beträgt der Minderungsgrad in dieser Auflage 73 %, wobei mit den metallischen Einbauten ein Minderungsgrad von 70 % erreicht wurde. In den letzten beiden Auflagen liegen die mittleren Konzentrationen sowohl beim Betrieb mit Einbautentechnik als auch ohne bei unter 1.000 mg/Vm^3 , wobei mit den metallischen Einbauten Minderungsgrade zwischen 4 % und 37 % und mit keramischen Einbauten zwischen 54 % und 60 % erzielt wurden.

Anhand der Mittelwerte im Diagramm 34 lässt sich feststellen, dass der gemäß der 1. BImSchV geforderte Grenzwert für Kohlenstoffmonoxid (1.250 mg/Vm^3) dank der Einbautentechnik auch bei einer erhöhten Brennstoffmasse einfach eingehalten werden kann.

Variation der Scheitenanzahl beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Die Scheitenanzahl hat in der Regel großen Einfluss auf die Verbrennungsqualität, wie im Abschnitt oben (Variation der Scheitenanzahl, S. 109) erklärt wurde. Wird die Scheitenanzahl variiert, ändert sich dadurch auch die aktive Oberfläche des Brennstoffs. Bei einer Vergrößerung findet die Vergasung intensiver statt, wobei ein hoher Sauerstoffbedarf entsteht. Bei einer Verringerung der Scheitenanzahl wird die Oberfläche des Brennstoffs verkleinert, wodurch die Zündung und die Verbrennung mit einer geringeren Geschwindigkeit ablaufen werden, sodass es zu einer starken Abkühlung des Feuerraums und hohen Konzentrationen nicht verbrannter Bestandteile im Abgas kommt.

In Diagramm 35 ist die mittleren Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids bei einer Beschickung mit drei Scheiten ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen sowie beim Betrieb der Speicherfeuerstätte mit vier Scheiten mit metallischen und keramischen Einbauten dargestellt. Dabei wurde die Auflagenmasse von $1,5 \text{ kg/Auflage}$ behalten. Dem Balkendiagramm ist zu entnehmen, dass Konzentrationen bei den Versuchen mit Einbautentechnik deutlich geringer sind als bei den Versuchen ohne Einbautentechnik. Direkt nach der Anheizphase agiert die Einbautentechnik und gewährleistet eine emissionsarme und stabile Verbrennung. Dabei ist auch zu erkennen, dass die keramischen Einbauten, wie bei den anderen Variationen der Betriebsparameter, eine bessere Verbrennung und somit Minderung des Kohlenstoffmonoxids sicherstellen.

Die thermische Wirkung der Einbautentechnik ist besonders in der Anheizphase während des Betriebs mit keramischen Einbauten zu sehen. Ohne die Einbautentechnik steigen die Konzentrationen bis 4.673 mg/Vm^3 an, wobei diese beim Betrieb mit keramischen Einbauten auf 2.613 mg/Vm^3 gesenkt werden. Dabei wurde ein Minderungsgrad der Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids von 44 % erreicht. Die metallischen Einbauten haben in

der Anheizphase nicht die gewünschte Reduzierung des Kohlenstoffmonoxids erreicht, die sie bei den anderen Variationen gezeigt haben. Es ist zu erwähnen, dass der Betrieb in der Anheizphase aufgrund niedriger Temperaturen nur schwierig reproduzierbar war.

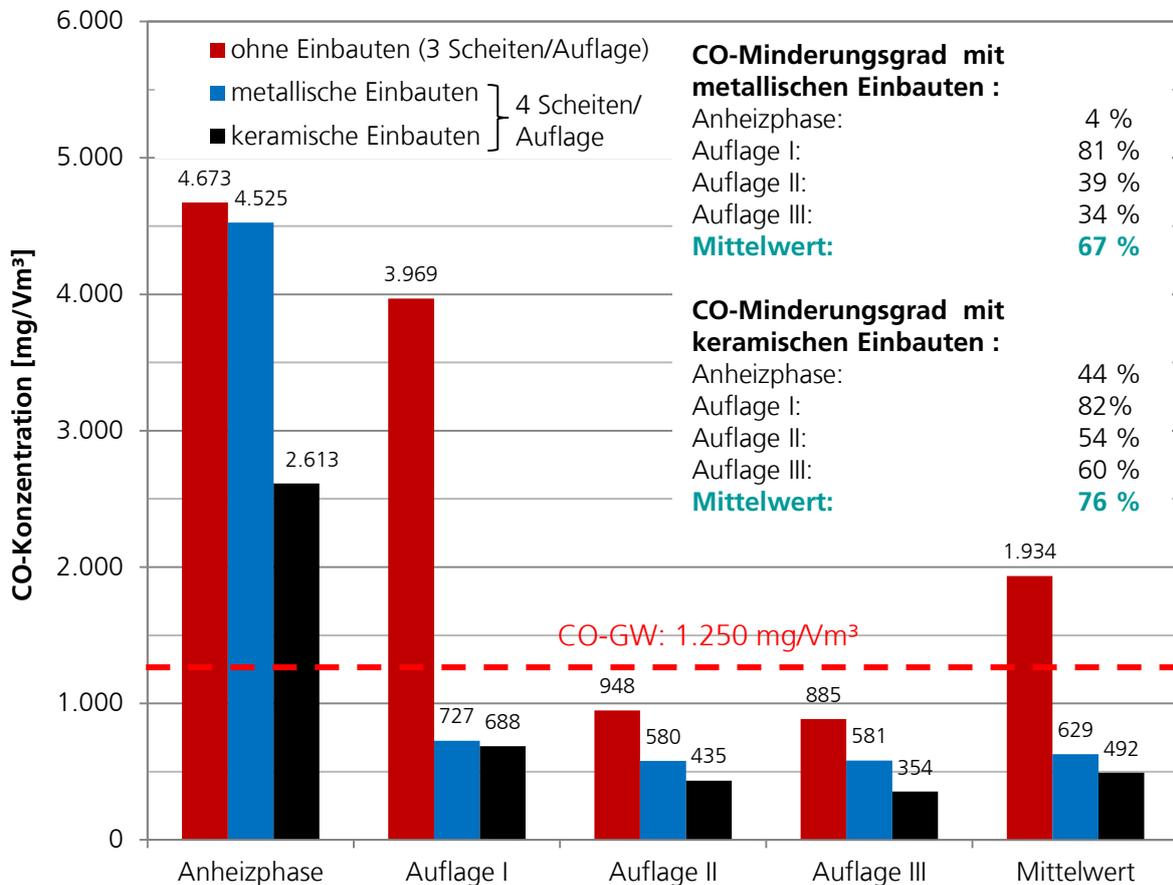


Diagramm 35: Kohlenstoffmonoxid ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei 4 Scheiten/Auflage.

Nach der Anheizphase war der Betrieb generell sehr stabil und reproduzierbar. Hier wurden beim Betrieb der Speicherfeuerstätte mit der Einbautentechnik durchschnittliche Minderungsgrade von 67 % beim Betrieb mit metallischen Einbauten und von 76 % mit keramischen Einbauten erreicht. Bei der Verringerung der Scheitenanzahl auf zwei Scheite hat die Einbautentechnik, ähnlich wie bei den Versuchen mit vier Scheiten, positive Wirkung auf die Minderung von Kohlenstoffmonoxid gezeigt (Diagramm 36). Dem Diagramm 36 ist zu entnehmen, dass die Speicherfeuerstätte bei der Auflage von zwei Scheiten ein ähnliches Verbrennungsverhalten sowohl in der Anheizphase als auch in den darauf folgenden drei Auflagen gezeigt hat. Ab der ersten Auflage nach der Anheizphase wirkt die Einbautentechnik und gewährleistet eine bessere Verbrennung. Im Allgemeinen waren die Konzentrationen sowie die Minderungsgrade bei der Verbrennung von vier Scheiten höher als beim Betrieb mit zwei Scheiten. Das lässt sich auf die langsamere Wärmefreisetzung zurückführen, die bei der Beschickung mit zwei Scheiten aufgrund der geringeren Brennstoffoberfläche entsteht. Aus den Konzentrationen in Diagramm 36 ist zu ersehen, dass der Grenzwert für

Kohlenstoffmonoxid für Speicherfeuerstätten bei diesem Prototyp nach der 1. BImSchV nur mit der Einbautentechnik eingehalten werden kann.

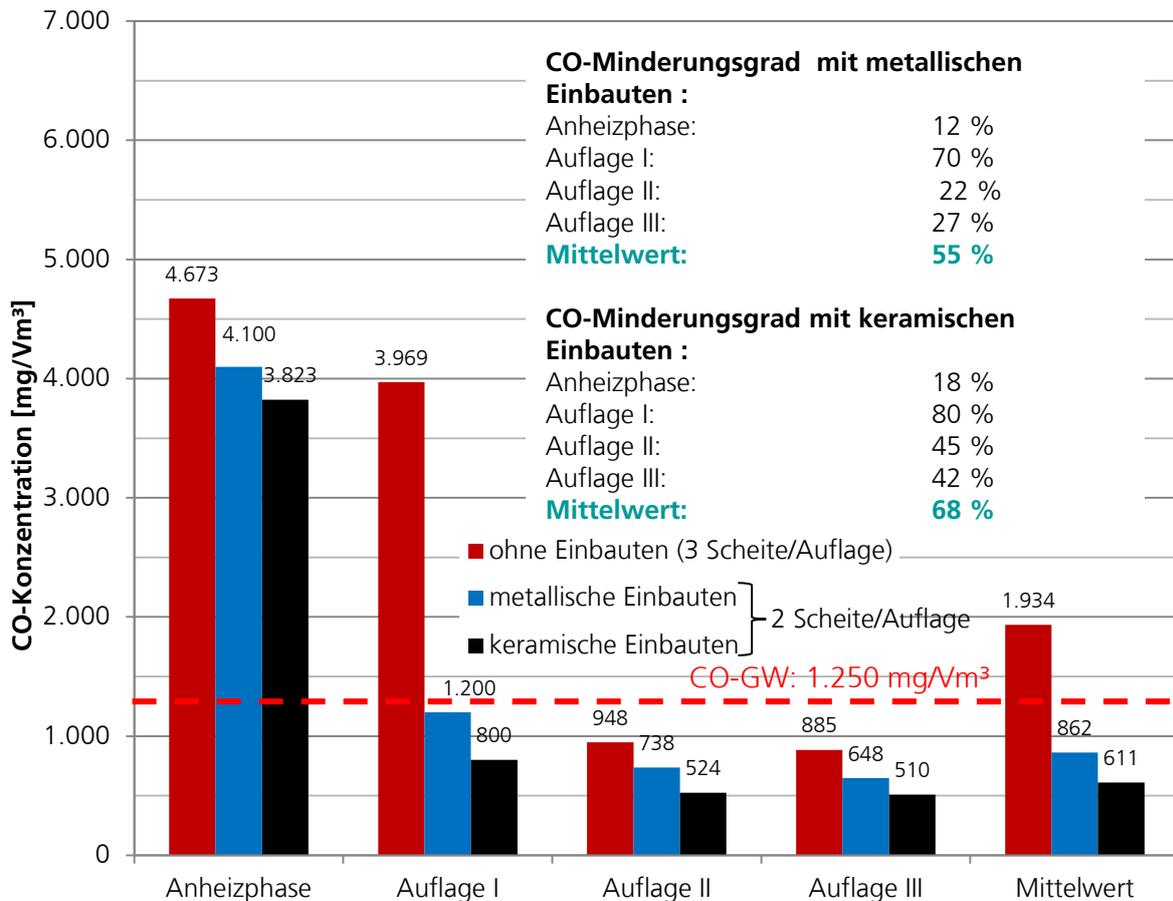


Diagramm 36: Kohlenstoffmonoxid ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei zwei Scheiten/Auflage.

Zusammengefasst ist festzustellen, dass mit der Einbautentechnik unabhängig von der Variation der Betriebsparameter (Abgasförderdruck und Beschickungsregime) eine ausschlaggebende Minderung des Kohlenstoffmonoxids und den damit korrelierenden Schadstoffen gewährleistet werden kann. Diese innovative Technik kennzeichnet sich dadurch aus, dass eine stabile Verbrennung und ein reproduzierbarer Betrieb zu erreichen sind. Dieses günstige Betriebsverhalten kann nicht nur auf dem Prüfstand sondern auch im Praxisbetrieb erzielt werden, wodurch sich die Schadstoffe in Wohngebieten nachhaltig und sicher mindern lassen.

Untersuchungen zu Gesamtkohlenwasserstoffen/ Speicherfeuerstätte

Kohlenwasserstoffe sind Produkte der unvollständigen Verbrennung. Gemäß der 1. BImSchV gibt es bisher keinen Grenzwert für Gesamtkohlenwasserstoffe. Gemäß dem österreichischen Art. 15 a B-VG sind für die Typprüfung von Einzelraumfeuerungsanlagen Grenzwerte für Gesamtkohlenwasserstoffe einzuhalten (Tabelle 3, Abschnitt 3.1). Außerdem sieht die ab dem Jahr 2022

zu geltende Ökodesigne-Richtlinie Grenzwerte für die Gesamtkohlenwasserstoffe (Tabelle 5, Abschnitt 3.1) vor.

Die Einbautentechnik hat eine besondere Funktion hinsichtlich der Minderung der Gesamtkohlenwasserstoffe gezeigt. Im Diagramm 37 sind die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs des Prototyps der Speicherfeuerstätte über mehrere Abbrände dargestellt. Es ist aus Diagramm 37 zu ersehen, dass die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe über den gesamten Betrieb der Speicherfeuerstätte niedriger liegen als beim Betrieb ohne Einbautentechnik und mit der Betriebszeit aufgrund schnellerer Bereitstellung günstigerer Betriebstemperaturen abnehmen. Dem Diagramm 37 ist außerdem zu entnehmen, dass die Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb mit den keramischen Einbauten vor allem in der Anfahrbetriebsphase (direkt nach dem Auflegen der Holzscheite) stärker gemindert wurden als bei dem Betrieb mit metallischen Einbauten.

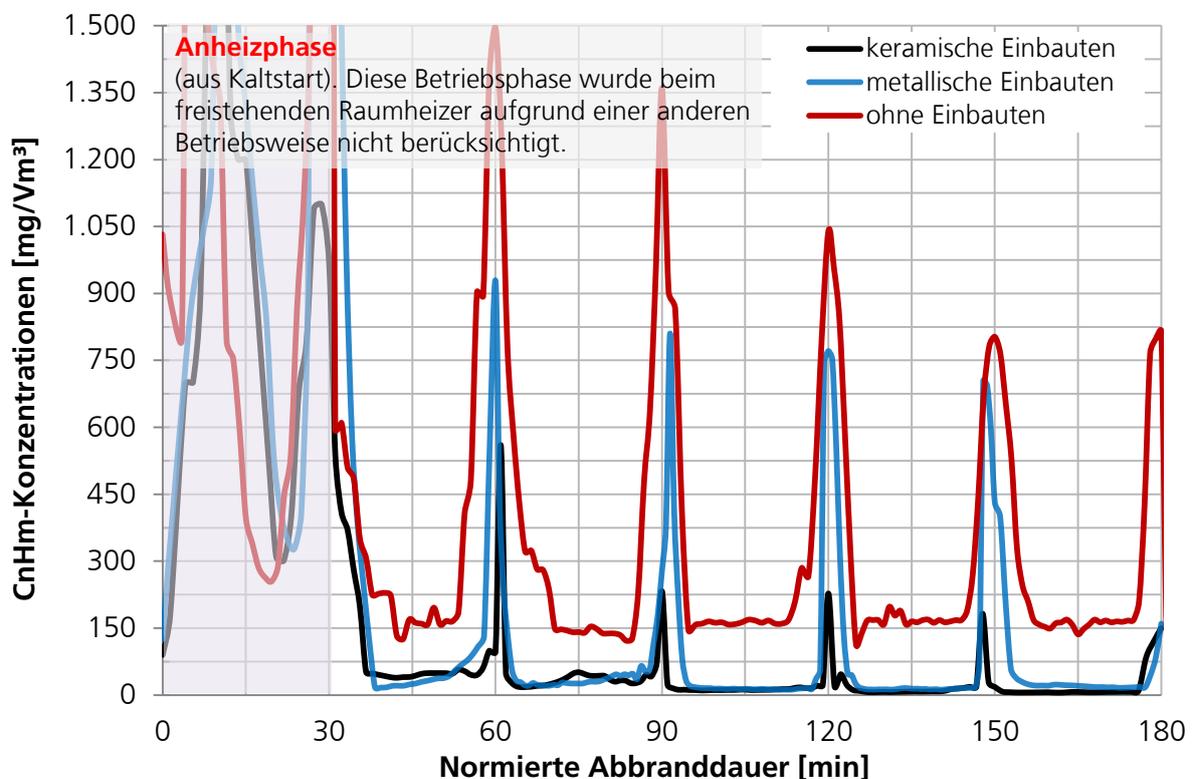


Diagramm 37: Kohlenwasserstoffe während des Betriebs ohne und mit metallischen und keramischen Einbauten.

Die bessere Funktion der Einbautentechnik ist nach der Anheizphase bzw. 30. Minuten nach dem Kaltstart im Diagramm 37 zu erkennen. Beim Erreichen günstiger Oxidationstemperaturen beginnt die thermische Behandlung der Gesamtkohlenwasserstoffe. Ab der ersten Auflage, nach der Anheizphase, sinken die Konzentrationen auf unter 50 mg/Vm³ (gemessen als Propan mit FID) und sinken im Laufe der Verbrennung weiter. In der zweiten sowie dritten Auflage ist die optimale Minderung der Gesamtkohlenwasserstoffe festzustellen. Im Diagramm 38 sind die Mittelwerte der

Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb mit optimalen Betriebseinstellungen mit und ohne Einbautentechnik dargestellt. Dem Diagramm 38 ist zu entnehmen, dass die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne Einbautentechnik in der ersten Auflage bei ca. 632 mg/Vm³ lagen, wobei diese Konzentrationen mit den metallischen Einbauten auf 64 mg/Vm³ sowie mit den keramischen Einbauten auf 54 mg/Vm³ reduziert wurden. Dies entspricht in beiden Fällen einem Minderungsgrad von über 90 %. In der zweiten und dritten Auflage lieferten die keramischen und metallischen Einbauten miteinander vergleichbar niedrige Konzentrationen an Gesamtkohlenwasserstoffen.

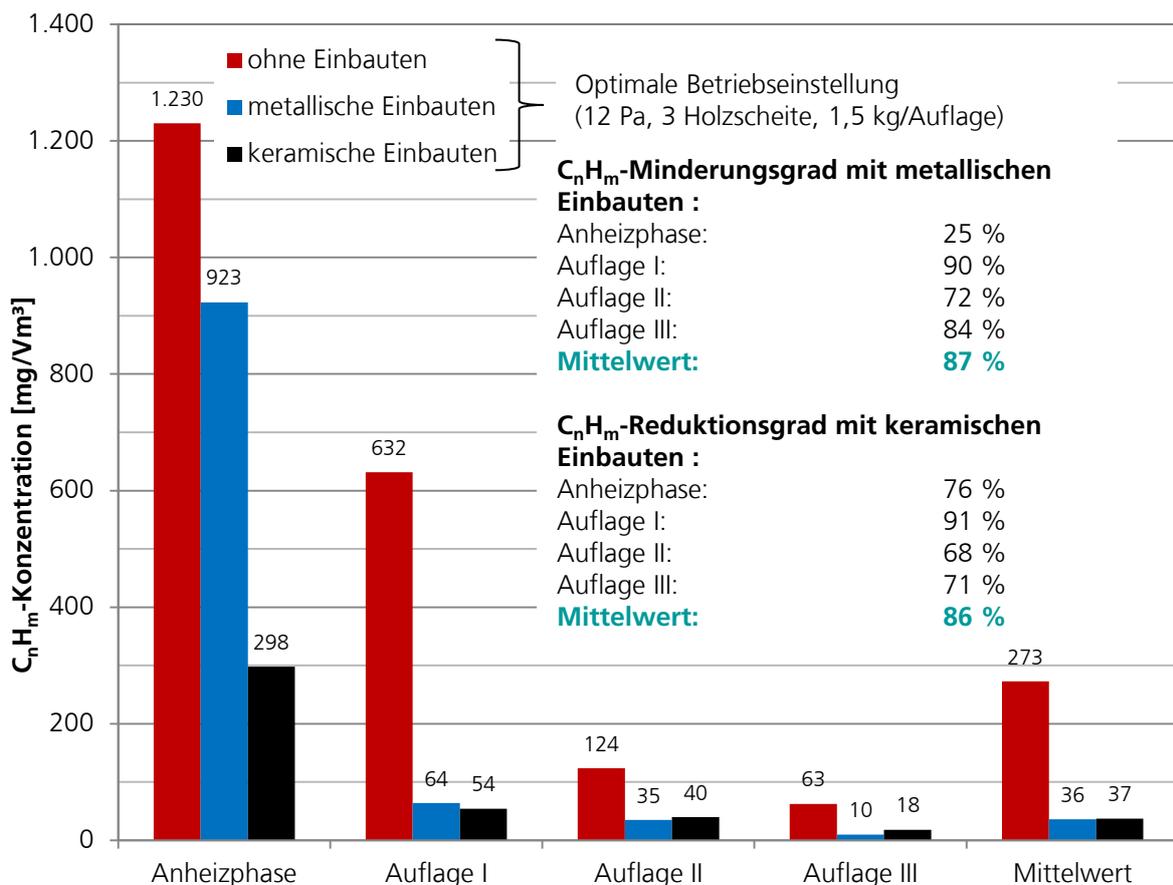


Diagramm 38: Gesamtkohlenwasserstoffe während des Betriebs ohne sowie mit Einbautentechnik bei optimalen Betriebseinstellungen.

Die Minderungsgrade der Gesamtkohlenwasserstoffe sind im Vergleich zu Kohlenstoffmonoxid höher (vergleiche Diagramm 31 mit Diagramm 38), da die Kohlenwasserstoffe eine geringere thermische Stabilität aufweisen als Kohlenstoffmonoxid. Dabei verläuft die Oxidation der Kohlenwasserstoffe zu Kohlenstoffmonoxid schneller als die anschließende Oxidation des Kohlenstoffmonoxids zu Kohlenstoffdioxid. Wie bei Kohlenstoffmonoxid wurde auch bei den Gesamtkohlenwasserstoffen durch den Einsatz der Einbautentechnik in der Speicherfeuerstätte eine deutliche Reduzierung

erreicht. In den folgenden Abschnitten wird der Einfluss einer Variation der Betriebsparameter Abgasförderdruck sowie Beschickungsregime untersucht.

Variation des Abgasförderdrucks beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Einzelraumfeuerungsanlagen werden gemäß den Prüfnormen mit einem Abgasförderdruck von 12 Pascal geprüft. In der Praxis variiert der Abgasförderdruck sehr stark. Diese Variation des Abgasförderdrucks beeinflusst das Verbrennungs- und Emissionsverhalten so stark, dass sich ein sachgemäßer Betrieb nur schwer erreichen lässt. Die Einflüsse einer Variation des Abgasförderdrucks sind in Abschnitt 6.1.2.3 (Variation des Abgasförderdrucks, S. 92) genauestens beschrieben. Ein stabiler Betrieb in der Praxis lässt sich nur erreichen, wenn die Einzelraumfeuerungsanlagen mit entsprechenden Technologien wie z. B. der Einbautentechnik ausgerüstet werden, die eine Stabilisierung der Strömung unabhängig von der Variation des Abgasförderdrucks, gewährleisten.

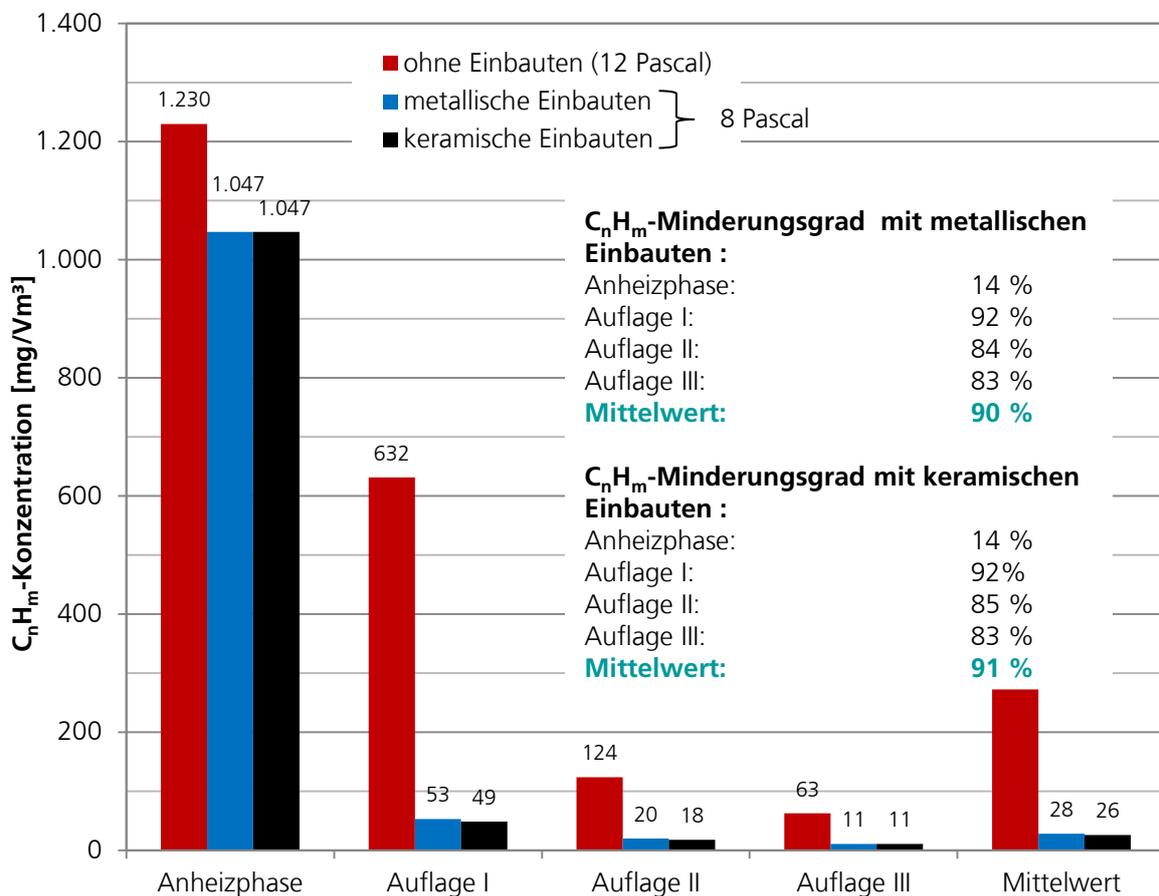


Diagramm 39: Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen mit 12 Pascal sowie mit metallischen und keramischen Einbauten bei einem Abgasförderdruck von 8 Pascal.

Wie bei Kohlenstoffmonoxid hat die Einbautentechnik auch eine bedeutsame Wirkung auf die Minderung der Gesamtkohlenwasserstoffe bei der Variation

des Abgasförderdrucks aufgewiesen. Im Diagramm 39 sowie im Diagramm 40 sind die die mittleren Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne Einbauten mit einem Förderdruck von 12 Pascal sowie mit keramischen und metallischen Einbauten bei einem Abgasförderdruck von 8 Pascal und 16 Pascal dargestellt.

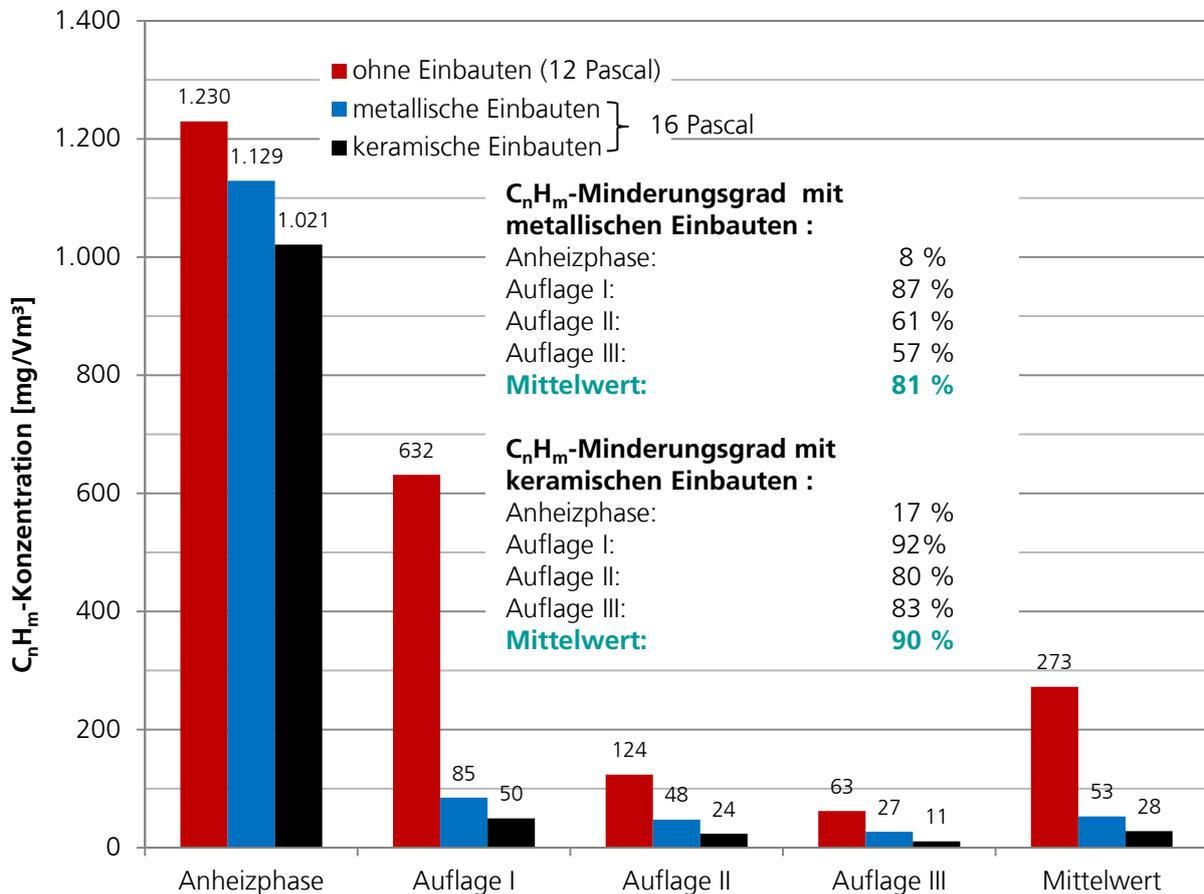


Diagramm 40: Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen mit 12 Pascal sowie mit metallischen und keramischen Einbauten bei einem Abgasförderdruck von 16 Pascal.

Wie bei den Versuchen mit optimalen Betriebseinstellungen bei einem Abgasförderdruck von 12 Pascal (siehe Diagramm 31) wurden auch bei der Variation des Abgasförderdrucks zwischen 8 Pascal und 16 Pascal deutlich niedrigere Konzentrationen an Gesamtkohlenwasserstoffen bei dem Betrieb der Speicherfeuerstätte mit Einbautentechnik erreicht als bei dem Betrieb ohne Einbautentechnik. Die keramischen Einbauten haben eine bessere Flexibilität gegenüber der Änderung des Abgasförderdrucks gezeigt als die metallischen Einbauten (vergleiche die Mittelwert im Diagramm 39 sowie im Diagramm 40). Bei metallischen Einbauten liegen die Konzentrationen bei einem Abgasförderdruck von 16 Pascal in allen Auflagen höher als bei den Versuchen mit einem geringeren Abgasförderdruck von 8 Pascal. Dies ist sowohl auf die Verringerung der Verweilzeit als auch auf die Kühlung der aktiven Reaktionszone sowie die relativ schlechtere Durchmischung

zurückzuführen. Die keramischen Einbauten haben hinsichtlich der Durchmischung des Abgases eine günstigere Architektur der Struktur und verfügen über eine höhere Wärmespeicherkapazität. Aus diesem Grund reagieren sie flexibler auf die erhöhte Verbrennungsluftmenge bei der Erhöhung des Abgasförderdrucks und stellen mehr Wärme für die Oxidation zur Verfügung als die metallischen Einbauten. Dieses Flexibilitätsverhalten der keramischen Einbauten wurde auch bei der Betrachtung des Kohlenstoffmonoxids festgestellt (vergleiche Diagramm 32 mit Diagramm 33). Es ist festzustellen, dass die Einbautentechnik dem Betrieb eine hohe Flexibilität gegenüber einer Variation des Abgasförderdrucks verliehen hat, sodass sowohl auf dem Prüfstand, als auch beim Praxisbetrieb eine stabile Verbrennung mit niedrigen Emissionen an nicht brennbaren Bestandteilen wie z. B. Gesamtkohlenwasserstoffe erreicht werden kann.

Variation der Brennstoffmasse beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Durch die Variation der beschickten Brennstoffmasse ändert sich nicht nur die thermische Leistung der Feuerungsanlage sondern auch das Verbrennungs- und Emissionsverhalten, wie in Abschnitt 6.1.2.3 (Variation der Brennstoffmasse, S. 95) ausführlich beschrieben wurde. Die Einbautentechnik hat, wie bei Kohlenstoffmonoxid (Diagramm 34), eine hohe Flexibilität gegenüber der Änderung der beschickten Brennstoffmasse gezeigt. Im Diagramm 41 sind die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb ohne Einbauten mit einer Brennstoffmasse von 1,5 kg/Auflage und beim Betrieb mit keramischen sowie metallischen Einbauten mit einer Brennstoffmasse von 2,5 kg/Auflage dargestellt.

Dem Balkendiagramm ist zu entnehmen, dass die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe, wie beim Kohlenstoffmonoxid (siehe Diagramm 34), mit der Einbautentechnik in allen Betriebsphasen niedriger sind als beim Betrieb ohne die Einbautentechnik, wobei die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe nach der Anheizphase mit keramischen Einbauten sowie mit metallischen Einbauten auf einem ähnlich Niveau liegen. In der Anheizphase liegen die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe ohne die Einbautentechnik bei ca. 1.230 mg/Vm³. Diese Konzentrationen wurden beim Betrieb der Speicherfeuerstätte mit metallischen Einbauten auf 780 mg/Vm³ sowie mit keramischen Einbauten auf 565 mg/Vm³ gesenkt. Nach der Anheizphase bzw. ab der ersten Auflage wurden mit den metallischen Einbauten und mit den keramischen Einbauten bei den jeweiligen Auflagen ähnliche Minderungsgrade zwischen 43 % und 92 % erreicht. Dabei lag der Mittelwert des Minderungsgrads bei den beiden Einbauten bei 82 %. Es ist folglich festzustellen, dass die Einbautentechnik auch bei der Erhöhung der Brennstoffmasse für niedrige Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe und für einen stabilen Betrieb der Speicherfeuerstätte gesorgt hat. Ein besonderes Merkmal dieser innovativen Technik liegt an der hohen Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit der Messergebnisse. Es ist zu erwähnen, dass die im Diagramm 41 gezeigten Ergebnisse nicht nur an einem Versuchstag, sondern über mehrere Versuchstage erreicht wurden.

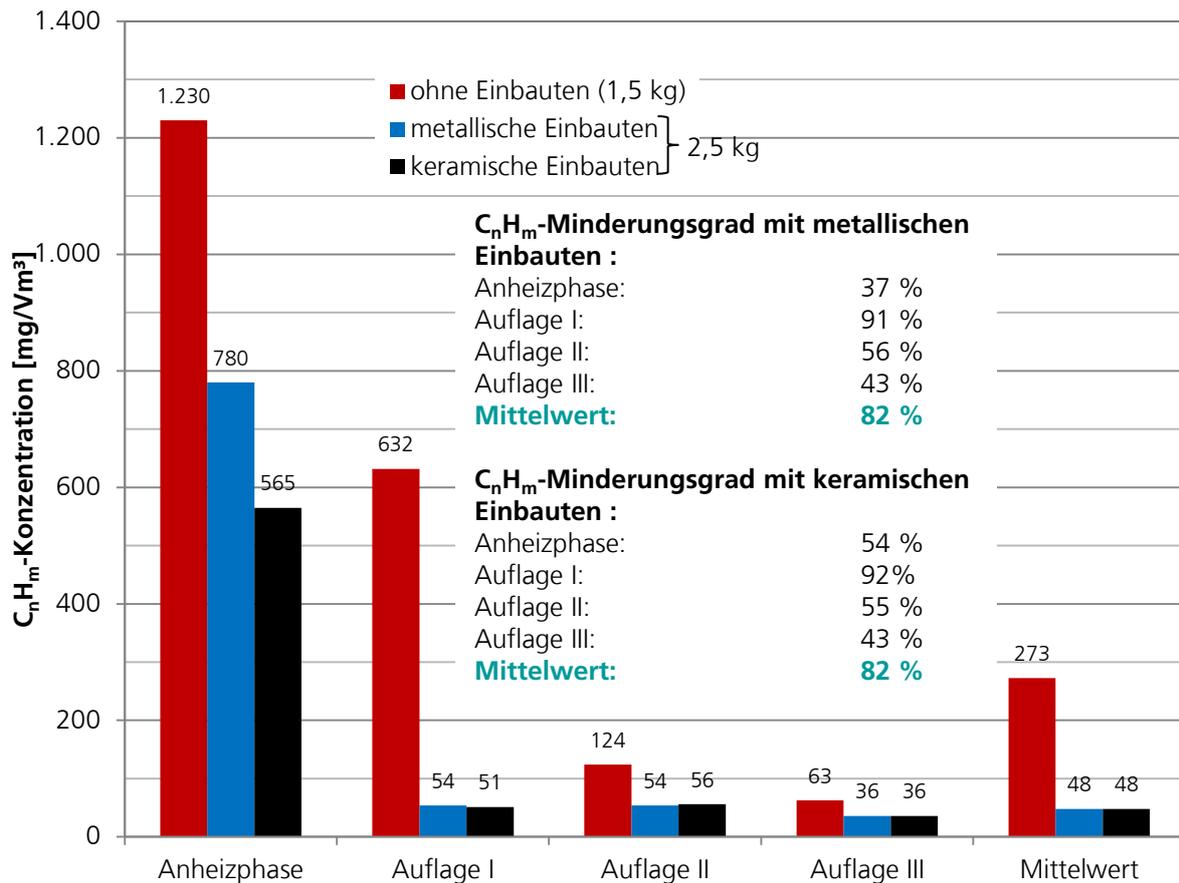


Diagramm 41: Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei unterschiedlichen Brennstoffmassen.

Variation der Scheitenanzahl beim Betrieb mit keramischen und metallischen Einbauten

Durch eine Variation der Scheitenanzahl wird das Verbrennungs- und Emissionsverhalten aufgrund der Änderung der aktiven Oberfläche des Brennstoffs sowie der Strömungsverteilung im Feuersraum stark beeinflusst. Bei Änderung der Oberfläche bei gleichzeitig fehlender Regelung der Verbrennungsluftzufuhr kann die Verbrennung schnell in einen Sauerstoffmangel geraten, sodass die Konzentrationen nicht verbrannter Bestandteile zunehmen. Im Diagramm 42 und im Diagramm 43 sind die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne Einbautentechnik, bei optimalen Betriebseinstellungen, sowie mit Einbautentechnik beim Betrieb mit 2 Scheiten/Auflage und 4 Scheiten/Auflage dargestellt.

Dem Diagramm 42 ist zu entnehmen, dass beim Einsatz der Einbautentechnik eine bedeutsame Minderung der Konzentration an Gesamtkohlenwasserstoffen in allen Betriebsphasen erreicht wurde. Sowohl in der Anheizphase als auch in der ersten Auflage haben die keramischen Einbauten eine bessere Minderungsleistung gezeigt als die metallischen Einbauten. In den

daraufliegenden Auflagen haben die keramischen sowie metallischen Einbauten eine vergleichbare Minderungsleistung aufgewiesen. Im Mittelwert war der Minderungsgrad beim Einsatz der keramischen Einbauten um 12 % besser als der Minderungsgrad der metallischen Einbauten. Hier lag der Minderungsgrad beim Einsatz der metallischen Einbauten bei 83 %, wobei beim Einsatz der keramischen Einbauten ein besonderes hoher Minderungsgrad von 95 % erreicht wurde. Die Einbautentechnik sorgt für eine sehr gute Oxidation und verhindert dadurch einen raschen Anstieg der Gesamtkohlenwasserstoffe, der normalerweise bei einer Erhöhung der Scheitenanzahl durch intensive Vergasung entsteht.

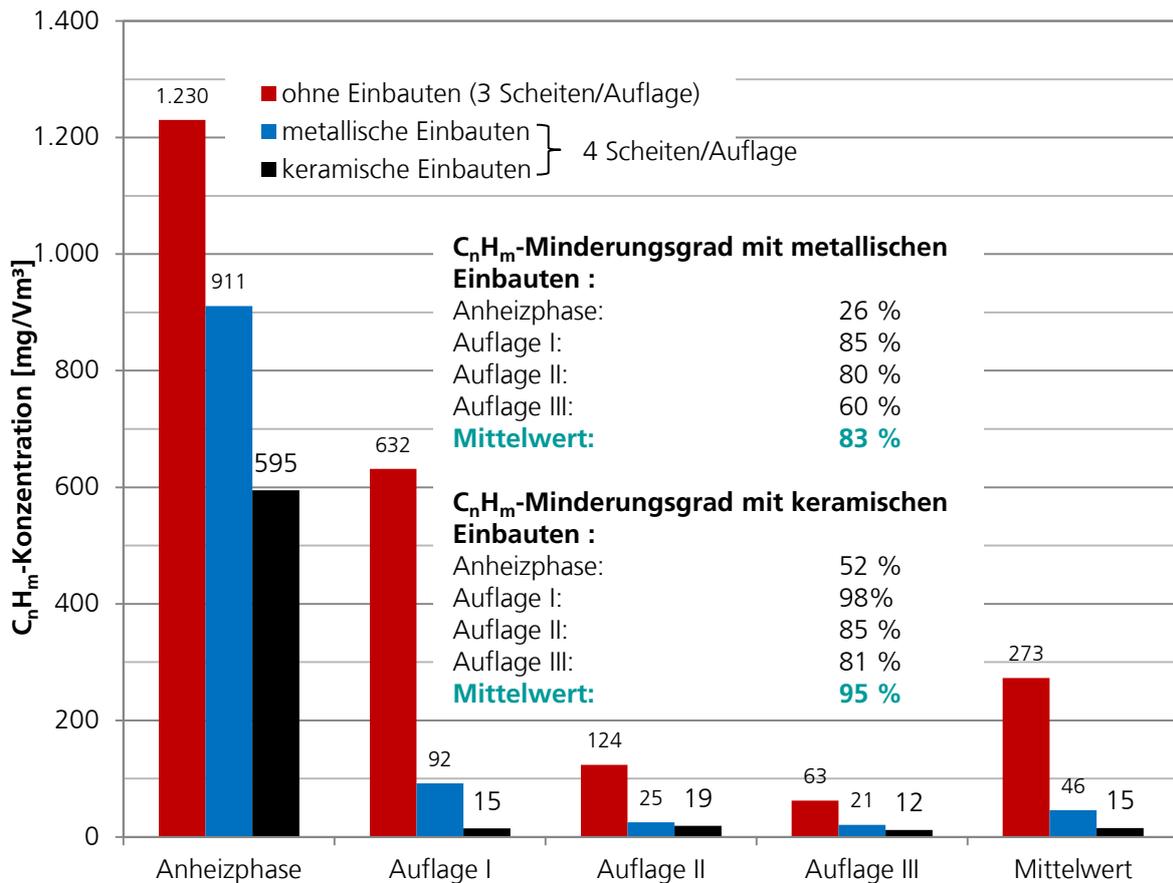


Diagramm 42: Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten mit einer Auflage von vier Scheiten.

Bei einer Verringerung der Scheitenanzahl wird in der Regel das Verbrennungs- und Emissionsverhalten durch die relativ langsame thermische Umsetzung des Brennstoffs beeinflusst. Dabei wird weniger Wärme freigesetzt, sodass kalte Zonen im Feuerraumbereich durch Kühlung mit der zugeführten Verbrennungsluft entstehen, in denen die Oxidation gehemmt werden kann. Dank der Einbautentechnik und beim Vergleich der Diagramm 42 und Diagramm 43 ist zu sehen, dass dieser Kühlungseffekt kaum zu bemerken bzw. aufgrund der Wärmespeicherung und Bereitstellung durch das Einbautenmodul abgeschwächt worden ist. In den beiden Betriebsfällen

(mit zwei Scheiten/Auflage, Diagramm 42 und mit drei Scheiten/Auflage, Diagramm 43) wurden miteinander vergleichbare Konzentrationen bzw. Minderungsgrade der Gesamtkohlenwasserstoffe vor allem beim Betrieb mit metallischen Einbauten ermittelt. Beim Betrieb der Speicherfeuerstätte mit keramischen Einbauten und mit vier Holzscheiten waren die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe mit 15 mg/Vm^3 deutlich geringer als die Konzentrationen beim Betrieb mit zwei Holzscheiten, welche bei 38 mg/Vm^3 lagen. In den beiden Betriebsfällen, die in Diagramm 42 und Diagramm 43 dargestellt sind, hat die Einbautentechnik für eine stabile Verbrennung mit reproduzierbaren Ergebnissen gesorgt. Für die Funktion der Einbautentechnik muss das Einbautenmodul erst die günstigen Oxidationstemperaturen erreichen und diese während des Betriebs mit Unterstützung der Verbrennungswärme beibehalten.

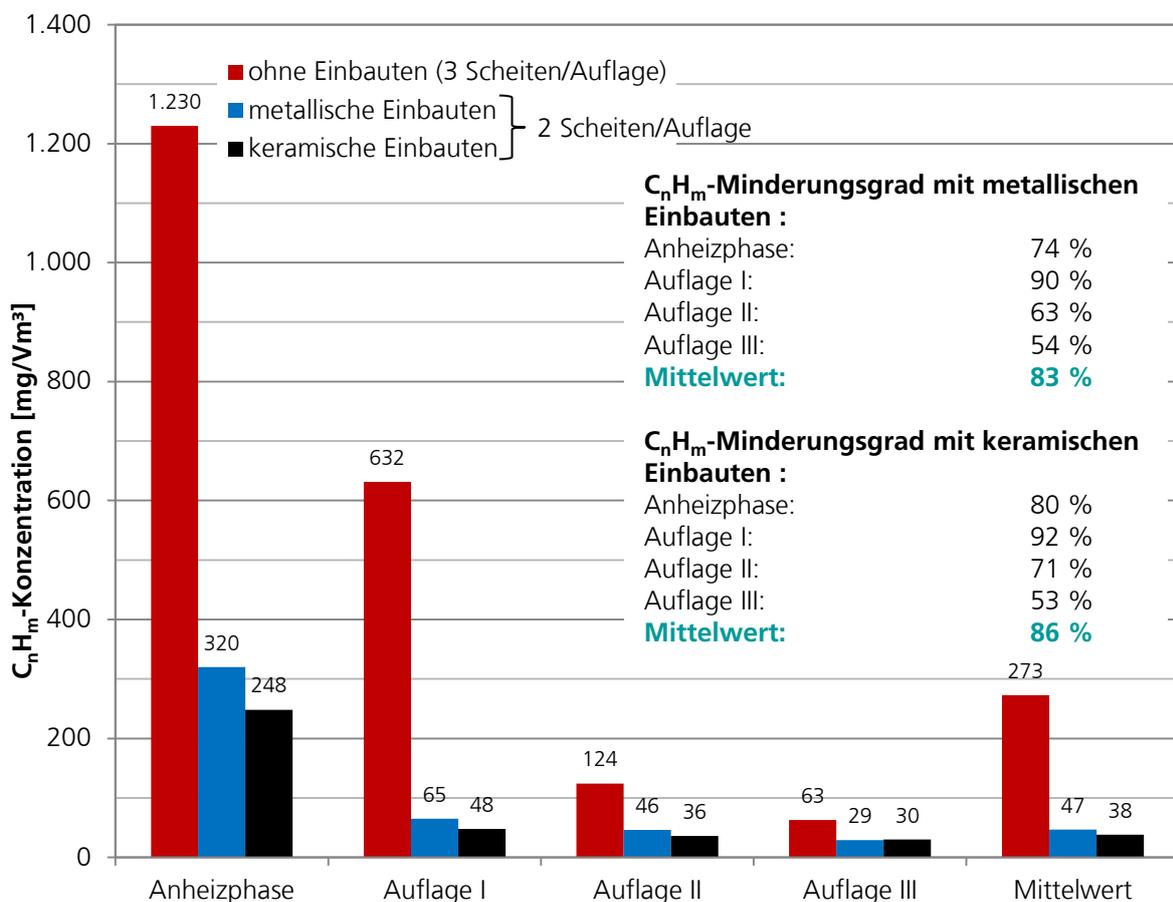


Diagramm 43: Gesamtkohlenwasserstoffe ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen und mit metallischen sowie keramischen Einbauten bei einer Auflage mit zwei Scheiten.

Trotz der Änderung der wichtigsten Betriebsparameter (Brennstoffmasse, Scheitenanzahl und Abgasförderdruck) hat die Speicherfeuerstätte durch den Betrieb mit der Einbautentechnik, wie beim Kohlenstoffmonoxid auch festgestellt wurde (siehe Diagramm 35), eine stabile Verbrennung mit niedrigen Konzentrationen an Gesamtkohlenwasserstoffen erreicht, sodass

die heutigen Grenzwerte für die Gesamtkohlenwasserstoffe gemäß des österreichischen Art. 15a B-VG (Tabelle 3) und die zukünftigen Grenzwerte der Ökodesign-Richtlinie (Tabelle 5) ohne Probleme eingehalten werden.

6.2.2.2 Auswertung gasförmiger Emissionen

In Tabelle 15 sind die Mittelwerte der gasförmigen Emissionen (Kohlenstoffmonoxid und Gesamtkohlenwasserstoffe gemessen als Propan mit FID) ohne Einbauten bei optimalen Betriebseinstellungen sowie mit keramischen und mit metallischen Einbauten bei einer Variation der Betriebsparameter dargestellt. Wie bei dem freistehenden Raumheizer nach DIN EN 13240 (Abschnitt 6.1.2.4), ist auch aus den Ergebnissen der Untersuchung mit der Speicherfeuerstätte herauszulesen, dass die Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid und der Gesamtkohlenwasserstoffe mit der Einbautentechnik gemindert werden können. Ohne den Einsatz der Einbautentechnik liegen die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids im Mittel bei 1.934 mg/Vm³ und bei den Gesamtkohlenwasserstoffen bei 273 mg/Vm³. Es ist zu erwähnen, dass die Mittelwerte der Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids und der Gesamtkohlenwasserstoffe beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne die Einbautentechnik sehr stark schwankten, sodass auch bei optimalen Betriebseinstellungen nur sehr schwer reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden konnten.

Tabelle 15: Auswertung gasförmiger Emissionen mit und ohne Einbautentechnik beim Einsatz in der Speicherfeuerstätte.

Einsatz der Feuerstätte	Variation	Anzahl der Scheite	Druck [pa]	Masse [kg]	CO [mg/Vm ³]	C _n H _m [mg/Vm ³]
Ohne Einbauten	Optimale Betriebseinstellung	3	12	1,5	1.934	273
Mit metallischen Einbauten	Optimale Betriebseinstellung	3	12	1,5	790	36
		3	16	1,5	573	53
	Förderdruck	3	8	1,5	494	28
		3	12	2,5	885	48
	Scheitenanzahl	2	12	1,5	629	47
		4	12	1,5	862	46
Mit keramischen Einbauten	Optimale Betriebseinstellung	3	12	1,5	578	37
		3	16	1,5	459	28
	Förderdruck	3	8	1,5	448	26
		3	12	2,5	616	48
	Scheitenanzahl	2	12	1,5	429	38
		4	12	1,5	611	15

Der Tabelle 15 ist zu entnehmen, dass sich Kohlenstoffmonoxid und die Gesamtkohlenwasserstoffe durch den Einsatz der Einbautentechnik mindern lassen. Mit metallischen Einbauten schwanken die Konzentrationen des

Kohlenstoffmonoxids beim Betrieb der Speicherfeuerstätte zwischen 494 mg/Vm³ und 862 mg/Vm³, wobei die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe zwischen 28 mg/Vm³ und 53 mg/Vm³ lagen. Mit den keramischen Einbauten wurden die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids und der Gesamtkohlenwasserstoffe im Vergleich zu den Ergebnissen mit den metallischen Einbauten stärker gemindert. Dabei lagen die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids zwischen 429 mg/Vm³ und 616 mg/Vm³, wobei die Konzentrationen der Gesamtkohlenwasserstoffe zwischen 15 mg/Vm³ und 48 mg/Vm³ schwankten.

Aus den in der Tabelle 15 dargestellten Ergebnissen lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die Einbautentechnik eine stabile und emissionsarme Verbrennung bei der Variation des Abgasförderdrucks (der zugeführten Verbrennungsluftmenge bzw. der Verbrennungslufteinstellungen) und des Beschickungsregimes (Brennstoffmasse, Scheitenanzahl) gewährleisten kann. Dadurch können die Emissionen der toxikologisch relevanten Komponenten im Abgas nachhaltig gemindert werden. Die Messergebnisse beim Betrieb der Speicherfeuerstätte mit der Einbautentechnik ließen sich mit einer hohen Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit erzielen. Dies stellt ein besonderes Merkmal der Einbautentechnik dar.

6.2.2.3 Staubbörmige Emissionen

Bei den staubbörmigen Emissionen ist zwischen den gravimetrisch messbaren Staubpartikeln (Gesamtstaubkonzentrationen, > 0,7 µm) und Staubpartikeln zu unterscheiden, die nur über ein Staubzählverfahren (Größenordnung zwischen 3,5 nm und 1 µm) erfasst werden können. Eine genaue Erläuterung zu den beiden Staubfraktionen ist in Abschnitt 6.1.2.5 dargestellt.

Bewertung des Gesamtstaubs anhand gravimetrischer Messung

In der Tabelle 16 sind die Konzentrationen und Abscheidegrade aus der gravimetrischen Staubmessung gemäß VDI 2066 beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne Einbauten mit optimalen Betriebsbedingungen sowie mit der Einbautentechnik bei einer Variation der Betriebsparameter dargestellt. Gemäß der 1. BImSchV darf bei der Emissionsprüfung von Speicherfeuerstätten nach DIN EN 15250 ein Grenzwert der Gesamtstaubkonzentration von 40 mg/Vm³ nicht überschritten werden. Der Tabelle 16 ist zu entnehmen, dass der gesetzliche Grenzwert für Stäube beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne Einbauten um 6 mg/Vm³ überschritten wurde. Dank der Einbautentechnik wurde der Staubgrenzwert unabhängig von der Betriebseinstellung problemlos eingehalten. Die ermittelten Gesamtstaubkonzentrationen lagen beim Betrieb der Speicherfeuerstätte mit metallischen Einbauten in Abhängigkeit von der Betriebseinstellung beim Betrieb mit metallischen Einbauten zwischen 13 mg/Vm³ und 35 mg/Vm³, wobei mit den keramischen Einbauten mit fast allen Betriebseinstellungen höhere Abscheideleistungen mit Gesamtstaubkonzentrationen zwischen 10 mg/Vm³ und 34 mg/Vm³ erreicht wurden. Die Einbautentechnik agiert sowohl als Reaktor als auch als Filter und gewährleistet somit mit hoher

Wiederholbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit eine bedeutsame Minderung der staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen.

Tabelle 16: Auswertung staubförmiger Emissionen mit und ohne Einbautentechnik.

Einsatz der Feuerstätte	Variation	Anzahl der Scheite	Druck [pa]	Masse [kg]	Staub [mg/Vm ³]	Abscheidegrad [%]
ohne Einbauten	Optimale Betriebseinstellung	3	12	1,5	46	-
Mit metallischen Einbauten	Optimale Betriebseinstellung	3	12	1,5	13	72
	Förderdruck	3	16	1,5	21	54
		3	8	1,5	15	67
	Brennstoffmasse	3	12	2,5	23	50
	Scheitenanzahl	2	12	1,5	35	24
4		12	1,5	34	26	
Mit keramischen Einbauten	Optimale Betriebseinstellung	3	12	1,5	10	78
	Förderdruck	3	16	1,5	19	59
		3	8	1,5	17	63
	Brennstoffmasse	3	12	2,5	20	57
	Scheitenanzahl	2	12	1,5	32	30
4		12	1,5	34	26	

Bewertung des Feinststaubs (5 nm bis 350 nm) anhand des Staubzählverfahren

Mit dem gravimetrischen Staubmessverfahren (Abschnitt 5.1.2) lassen sich Feinstäube mit Durchmessern größer als 0,7 µm erfassen. In kleineren Größenbereichen lassen sich die Staubpartikel gravimetrisch nicht mehr erfassen. Diese Anzahl dieser Feinststaubpartikel wird über Zählverfahren, beispielsweise mit einem SMPS-Spektrometer (Scanning Mobility Particle Sizer) erfasst, welches im Rahmen dieses Projekts mit einem speziellen Verdünnungstunnel zwecks langzeitiger und kontinuierlicher Messung verwendet wurde, wie dies im Abschnitt 6.1.2.5 bereits erklärt wurde. Gemäß der 1. BImSchV sind bei einer Emissionsprüfung von Einzelraumfeuerungsanlagen nur Grenzwerte für Gesamtstaub nach VDI 2066 gefordert, obwohl die im Nanometerbereich liegenden Feinststäube über 90 % der Gesamtstaubemissionen ausmachen.

Die Bewertung der Staubminderung durch den Einsatz der Einbautentechnik wurde sowohl anhand einer gravimetrischen Messung gemäß VDI 2066 (Abschnitt 5.1.2) als auch anhand eines Staubzählverfahrens durchgeführt. Im Diagramm 44 sind die Verteilungen der Partikelanzahl zwischen 5 nm bis 350 nm pro Kubikzentimeter Abgasvolumen während des Betriebs der Speicherfeuerstätte ohne Einbautentechnik sowie mit der Einbautentechnik beim Einsatz von keramischen und metallischen Einbauten dargestellt. Im Diagramm 44 ist ersichtlich, dass die Feinststäube durch den Einsatz der

Einbautentechnik bedeutsam gemindert wurden. Der Minderungsgrad beim Betrieb der Speicherfeuerstätte mit keramischen Einbauten schwankt zwischen 65 % und 90 % und war damit deutlich höher als beim Einsatz von den metallischen Einbauten, bei denen der Minderungsgrad zwischen 40 % und 55 % lag. Dem Diagramm 44 ist außerdem zu entnehmen, dass die Verteilungskurve mit der Einbautentechnik leicht in Richtung der größeren Staubfraktionen verschoben wurde. Dieser Effekt lässt sich mit der Agglomeration sowie hoher Effizienz der thermischen Behandlung der Feinstäube begründen.

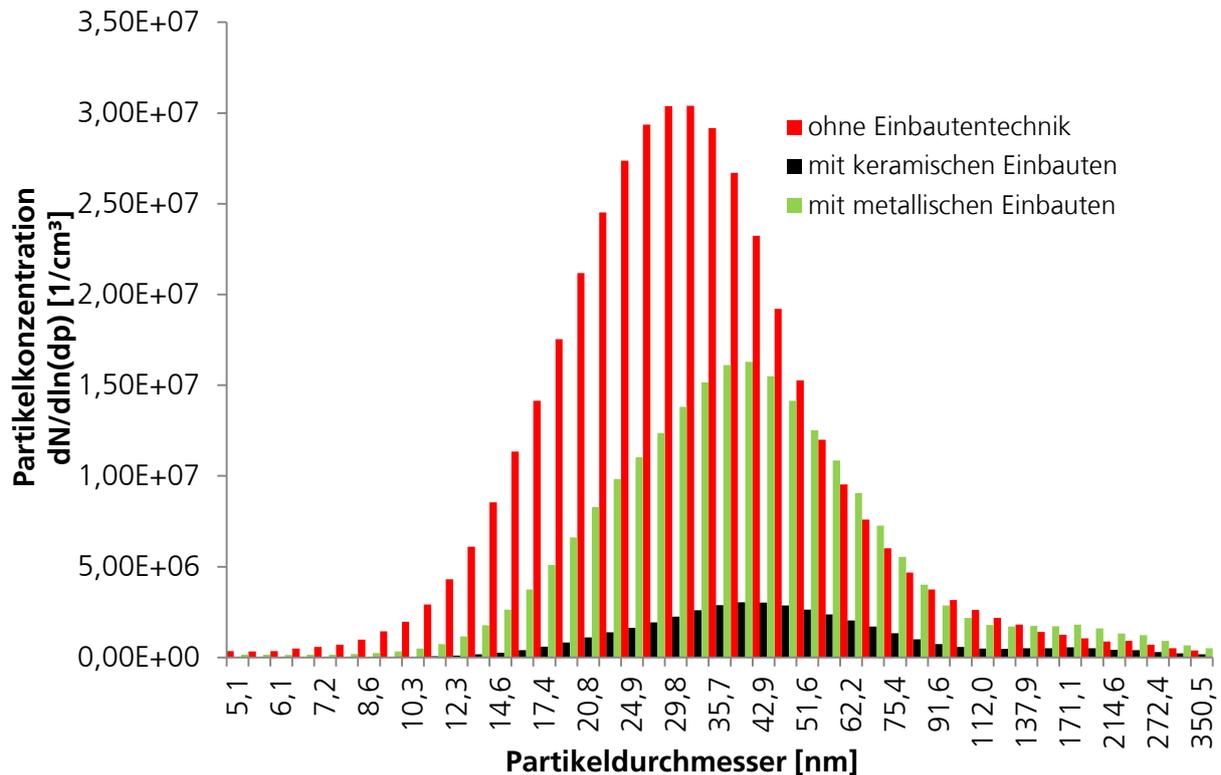


Diagramm 44: Partikelanzahlverteilung beim Einsatz keramischer Einbauten beim Nennwärmeleistungsbetrieb in der Speicherfeuerstätte.

Bei der thermischen Behandlung der Feinstäube spielen die morphologischen sowie physikalischen Eigenschaften (Rauigkeit, spezifische Wärmekapazität) der Einbauten-Materialien eine große Rolle. Zwar wurde der Einfluss der Materialeigenschaften in diesem Projekt nicht erforscht, aber die Ergebnisse aus den Versuchen haben gezeigt, dass mit den metallischen Einbauten andere Ergebnisse erzielt wurden als mit den keramischen Einbauten. Ein großes Optimierungspotential besteht in der gezielten Entwicklung von Einbauten, mit denen das Funktionsprinzip der Einbautentechnik (siehe Abschnitt 4.2) begünstigt wird. Hier sind offene Forschungsfragen sowohl hinsichtlich des Materials als auch hinsichtlich der Konstruktion und der Architektur zu behandeln.

6.2.2.4 Untersuchung zur Verbrennungseffizienz/Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist eine Größe zur Beschreibung der Effizienz einer Feuerungsanlage. Gemäß der 1. BImSchV müssen Speicherfeuerstätten während der Emissionsprüfung einen Mindestwirkungsgrad von 75 % einhalten können. Im Unterschied zu Feuerstätten mit einer schnellen Wärmeabgabe, wie beispielsweise Raumheizer gemäß DIN EN 13240 oder Kamineinsätze gemäß DIN EN 13229, werden die Speicherfeuerstätten nach DIN EN 15250 mit einer vom Hersteller vorgegebenen Brennstoffmasse betrieben. Der Wirkungsgrad hängt direkt von der Masse und dem Speicherverhalten der Wärmespeichersteine (Schamotte oder Speckstein oder Beton) ab. Um eine Feuerstätte als Speicherfeuerstätte bezeichnen zu dürfen, muss eine Mindestwärmespeichermasse verfügbar sein und die Feuerstätte mit einer Mindestbrennstoffmasse betrieben werden, sodass die Dauer bis zum Erreichen der maximalen Oberflächentemperatur und dem anschließenden Abfall auf 50 % dieses Maximalwerts während der Leistungsprüfung nicht kleiner als vier Stunden ist. In der Regel nimmt der Wirkungsgrad bei Speicherfeuerstätten mit zunehmender Betriebszeit bzw. mit der beschickten Brennstoffmasse ab (Diagramm 45).

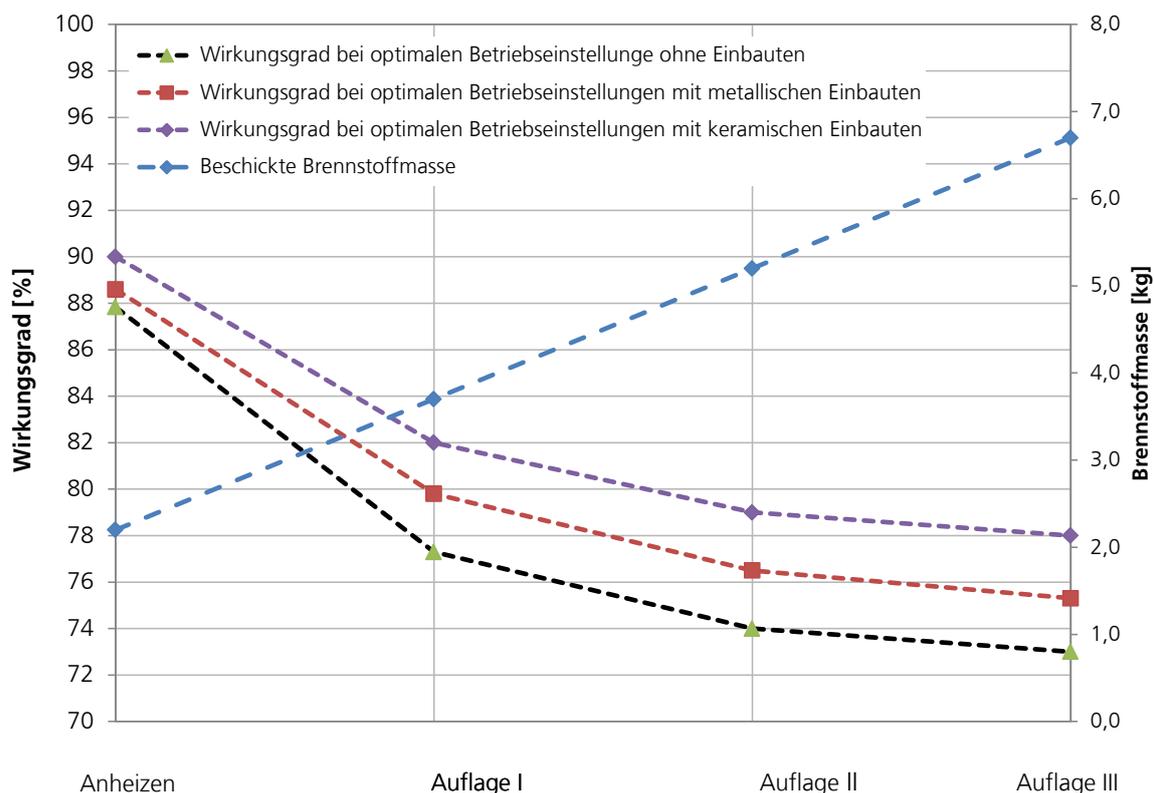


Diagramm 45: Wirkungsgrade beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne und mit Einbautentechnik.

Der Hauptgrund für diese Abnahme ist der Anstieg der Abgastemperatur, welche beim Erreichen der maximalen Wärmespeicherkapazität der Wärmespeichersteine den höchsten Wert erreichen. Im Diagramm 45 sind die

Wirkungsgrade beim Betrieb der Speicherfeuerstätte ohne und mit Einbautentechnik mit optimierten Betriebseinstellungen dargestellt. Es ist zu ersehen, dass der Wirkungsgrad in jeder Auflage mit der Einbautentechnik höher lag als ohne die Einbautentechnik. Außerdem wurden mit den keramischen Einbauten in jeder Auflage bessere Wirkungsgrade ermittelt als mit den metallischen Einbauten. Der Grund hierfür beruht auf den besseren Struktur- und Materialeigenschaften der keramischen Einbauten, wodurch eine bessere Stabilisierung der Strömung und eine höhere Wärmespeicherung bzw. bessere Wärmeverwaltung erzielt werden kann.

Die Verbesserung der Effizienz beim Einsatz der Einbautentechnik kann auf die bessere thermische Umsetzung der sich im Abgas befindenden energiehaltigen Bestandteile, auf die Speicherung und bessere Verwaltung der während der Verbrennung freigesetzte Wärme und auf die Stabilisierung der Strömung ohne Generierung eines hohen Druckverlusts zurückgeführt werden. Die nach dem Auflegen schlagartig entstehende Wärmemenge wird durch das Einbautenmodul stark absorbiert bzw. gespeichert, wodurch sich die Temperaturen im Einbautenmodul bis 850 °C erhöhen. Diese gespeicherte Wärme wird von der Einbautentechnik anschließend langsam abgestrahlt und effektiver in der Speichersteinmasse gespeichert. Durch die strömungsstabilisierende Wirkung der Einbautentechnik wird weniger Verbrennungsluft in den Verbrennungsprozess gegeben, ohne die Verbrennungsqualität aufgrund der verbesserten Durchmischung negativ zu beeinflussen. Durch die geringere Menge zugeführter Verbrennungsluft wird ein geringerer Abgasvolumenstrom entstehen, wodurch die Verweilzeit des Abgases in der aktiven Reaktionszone sowie in der gesamten Speicherfeuerstätte verlängert und die Wärmespeicherung in der Speicherfeuerstätte mit dem Wirkungsgrad entsprechend verbessert wird. Dieser Prototyp hat sich zwar wie eine Speicherfeuerstätte verhalten, jedoch war der Wirkungsgrad durch die geringe betonartige Wärmespeichermasse relativ niedrig. In der Regel haben Speicherfeuerstätten einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von über 88 % und verfügen über Wärmespeichermassen von über 600 kg aus hochwertigen Schamott oder Specksteinen.

7 Umsetzbarkeit der Einbautentechnik in der Praxis

Zur hohen Umsetzbarkeit sollen die Schadstoffminderungstechnologien zum Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen eine dauerhafte Funktion bzw. im Laufe der Nutzungszeit keine technische Alterung aufweisen sowie sich sicher, wirtschaftlich und ohne großen technischen Aufwand in die Feuerungsanlagen integrieren lassen. Außerdem sollen sie positive ökologische Effekte in allen Phasen ihres Lebenszyklus aufweisen. Die praktische Umsetzbarkeit der Einbautentechnik in Einzelraumfeuerungsanlagen wird in diesem Abschnitt aus einer technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Sichtweise betrachtet und bewertet.

7.1 Umsetzbarkeit der Einbautentechnik aus technischer und normativer Sicht

Bei der Einbautentechnik handelt es sich um eine innovative Technik mit einem natürlichen Wirkungsprinzip, das einen nachhaltigen Effekt zur Minderung der staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen sowie eine bedeutsame Erhöhung der Verbrennungseffizienz vor allem im Praxisbetrieb gewährleistet. Dank der flexiblen Modulbauweise lässt sich diese Technik in allen Einzelraumfeuerungsanlagen, unabhängig von der Konstruktion und dem Verbrennungskonzept integrieren und sich sicher gemäß den normativen Anforderungen betreiben.

Charakteristisch für die Branche im Bereich der nicht genehmigungsbedürftigen Kleinf Feuerungsanlagen ist, dass es viele Kleinunternehmen (weniger als 12 Personen) gibt, die meistens über keine speziell für diesen Bereich ausgebildeten Fachkräfte oder entsprechende Maschinen zur Implementierung komplizierter Technologien verfügen. Diese Erkenntnis macht die Einbautentechnik besonders wichtig und attraktiv für den Markt. Die benötigten Einbauten (metallische und keramische Pall-Ringe) bzw. Füllkörper sind nicht nur preiswert, sondern auch auf dem deutschen und europäischen Markt erhältlich. Die Lebensdauer dieser Einbauten ist mit der Lebensdauer der technischen Teile der Feuerungsanlagen vergleichbar. Ein Austausch der Einbautenmodule sollte bei einem sachgemäßen Betrieb nicht notwendig sein.

Ein besonderer technischer Vorteil der Einbautentechnik liegt darin, dass die Technik sehr niedrige Druckverluste (< 2 Pascal) verursacht, welche auch nach tausenden von Betriebsstunden konstant bleiben und ohne jegliche Wartungs- oder Reinigungsarbeiten eingesetzt werden kann. Dadurch lässt sich die Einbautentechnik in der Praxis auch nur mit Naturzug, ohne jegliche Stromversorgung oder Wartungsaufwand betreiben. Dieses stabile Druckverlustverhalten führt zu einem sicheren Betrieb in der Praxis. Ein Austreten von Abgasen in den Aufstellraum ist bei einer richtigen Auslegung der Einbautentechnik auszuschließen. Ein Abgasbypass bei der Integration der Einbautentechnik ist aufgrund großer Abgaswege (> 40 mm) im Einbautenmodul nicht notwendig.

Das Schadstoffminderungspotential durch den Einsatz der Einbautentechnik in Einzelraumfeuerungsanlagen ist vergleichbar mit dem Minderungspotential einer hochintelligenten Regelung, die aber bisher nur zur Erhöhung der Anschaffungskosten führt und bisher keine stabile Verbrennungsstabilität gewährleisten kann. Gemäß dem Stand der Technik können intelligente Regler kein stabiles Betriebsverhalten beim Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen gewährleisten, da die Störgrößen bedienungs- und verbrennungskonzeptbedingt einen deutlich größeren Einfluss haben als die Regelgrößen, die durch die herkömmliche Sensorik (wie z. B. Lambda-Sonde) generiert werden können.

In den Feuerraum integrierte, auf Basis reiner thermischer Oxidation funktionierende Technologien (Filter-Reaktor-Systeme), die den

Verbrennungsprozess durch die Gewährleistung günstiger Oxidationsbedingungen unterstützen, gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie in der Regel eine sichere Funktion bezüglich der Schadstoffminderung und Effizienzerhöhung, unabhängig von der Bedienungsqualität der Feuerungsanlagen, haben und sich sowohl technisch einfach als auch wirtschaftlich einsetzen lassen.

7.2 Umsetzbarkeit der Einbautentechnik aus wirtschaftlicher Sicht

Beim Einsatz von integrierten Technologien zur Schadstoffminderung in Einzelraumfeuerungsanlagen ist wichtig, dass dadurch die Feuerungsanlage nicht nur qualitativ hochwertiger, sondern auch kostengünstig und konkurrenzfähig gestaltet werden kann. Ist dies nicht zu gewährleisten, sinkt das Interesse am Einsatz solcher innovativen Technologien drastisch.

Handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen werden auf dem deutschen Markt mit einer sehr großen Preisspanne zwischen mehreren hundert bis mehreren tausend Euro angeboten. Optimal ist die Entwicklung von wirksamen Emissionsminderungsmaßnahmen, die sich in alle Einzelraumfeuerungsanlagen unabhängig von dieser großen Preisspanne wirtschaftlich integrieren lassen. Diese sehr wichtigen Voraussetzungen wurden vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP während der Entwicklung der Einbautentechnik für eine erfolgreiche Umsetzung in der Praxis besonderes berücksichtigt.

Die Anschaffungskosten der nötigen Einbauten zur Herstellung des Einbautenmoduls sind verhältnismäßig gering. Beispielsweise kostet ein Kubikmeter (5.700 Stück) keramische Pall-Ringe (50 mm) ca. 500 €. Pro Einzelraumfeuerungsanlagen werden durchschnittlich ca. 50 Pall-Ringe benötigt. Das bedeutet, dass mit einem Kubikmeter keramischer Pall-Ringe (50 mm) mehr als 114 Einzelraumfeuerungsanlagen ausgerüstet werden können. Dadurch ergeben sich spezifische Anschaffungskosten von weniger als 5 € pro Einzelraumfeuerungsanlage.

Die Einbautentechnik ist eine vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP erfundene und patentierte Technik. Zum Einsatz dieser Technik soll eine Lizenzgebühr mitkalkuliert werden. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP hat ein Lizenzmodell entwickelt (Technik- und Know-how-Lizenz), bei dem die Einbautentechnik von allen interessierten Unternehmen ohne Einschränkung oder Monopolisierung eingesetzt und somit eine breitere Anwendung in der Praxis erreicht werden kann. Bei diesem Lizenzmodell soll je nach verkaufter Stückzahl bis zu 5,5 % des Netto-Verkaufspreis der Einzelraumfeuerungsanlage und maximal 155 € vom Hersteller bezahlt werden. Außerdem unterstützt das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP im Rahmen dieses Lizenzmodells mit seinen langjährigen Erfahrungen und Expertisen im Bereich der Verbrennung und Abgasbehandlung alle Unternehmen bei der technischen Umsetzung der Einbautentechnik. Die beim Einsatz der Einbautentechnik anfallenden Gesamtkosten lassen sich aufgrund der Verbrennungseffizienzsteigerung im Praxisbetrieb bereits nach der

Verbrennung von weniger als sechs Kubikmetern Holz amortisieren. Dabei ist mit einer durchschnittlichen Brennstoff- und somit Betriebskostensparnis von mindestens 15 % zu rechnen. Aufgrund der sehr niedrigen Anschaffungskosten und angemessenen Lizenzgebühren bzw. der sehr einfachen technischen Umsetzung der Einbautentechnik kann jedes Unternehmen diese innovative Technik anwenden, welche nicht nur sehr niedere Emissionen sondern auch eine erhöhte Verbrennungseffizienz, vor allem unter Praxisbetriebsbedingungen, gewährleisten kann.

7.3 Umsetzbarkeit der Einbautentechnik aus ökologischer Sicht

Nach den neuesten Erkenntnissen leiden viele Gebiete in Deutschland unter zu hoher Feinstaubbelastung, zu der die biomassebetriebenen Kleinfeuerungsanlagen, vor allem Einzelraumfeuerungsanlagen, maßgeblich beitragen. Diese Kenntnisse fordern die Entwicklung entsprechender Technologien zur nachhaltigen Minderung von staub- und gasförmigen Emissionen, welche nicht nur gesundheits- sondern auch klimarelevant sind.

Die Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass die Einbautentechnik sowohl als Feinstaubfilter, sowie auch als Oxidationsreaktor agiert. Durch diese Doppelfunktion werden sowohl die staub- als auch die gasförmigen Schadstoffemissionen (z. B. Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe usw.) massiv reduziert als auch eine stabile effiziente Verbrennung erreicht. Diese bedeutsame Reduzierung ist nicht nur auf dem Prüfstand sondern auch im Praxisbetrieb aufgrund der hohen Flexibilität der Einbautentechnik gegenüber den Änderungen der Verbrennungsparameter zu erwarten. Ein besonderer Vorteil der Einbautentechnik liegt darin, dass das Einbautenmodul für eine kontrollierte, konstante Wärmeabgabe während der Verbrennung, durch rasche Absorbierung der Wärmespitzen sorgt, wodurch eine effizientere Wärmespeicherung und folglich eine Effizienzsteigerung gewährleistet werden kann. Durch diese Effizienzsteigerung kann eine bedeutsame Brennstoff- sowie Kohlendioxidersparnis von mindestens 15 % erzielt werden.

Beispielsweise wird beim Betrieb einer mit der Einbautentechnik ausgerüstete Einzelraumfeuerungsanlage eine jährliche Brennstoffmenge von ca. 400 kg eingespart. Das entspricht ca. einem Kubikmeter trockenem Holz. Diese Ersparnis gilt unter der Annahme, dass die Einzelraumfeuerungsanlage 1.000 Stunden pro Jahr mit einer Effizienzerhöhung von 15 % betrieben wird, was sich beim Einsatz der Einbautentechnik sicher und sehr reproduzierbar im Praxisbetrieb erreichen lässt. Durch diese Brennstoffersparnis werden nicht nur Brennstoffkosten von mindestens 80 € pro Jahr sondern auch ca. eine Tonne Kohlenstoffdioxid eingespart. Der ökologische Beitrag der Einbautentechnik ergibt sich nicht nur durch die Brennstoff- und somit Kohlendioxidersparnis sondern auch durch die bedeutsame Minderung von Feinstäuben und sonstigen Schadgasen, welche bisher ein großes Problem in vielen Gebieten in Deutschland darstellen, in denen primär mit Holz geheizt wird.

Ein wichtiger ökologischer Aspekt bei der Einbautentechnik besteht darin, dass für die Herstellung der Technik bzw. Einbautenmodule nur natürliche Materialien aber keine Edelmetalle oder seltenen Erden benötigt werden. Dadurch lässt sich die Einbautentechnik nicht nur bei der Produktion, bei dem Aufbau und dem Betrieb, sondern auch bei der Entsorgung als besonders ökologisch bewerten.

8 Verwertung der erzielten Ergebnisse

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die Einbautentechnik bezüglich des Einsatzes in Einzelraumfeuerungsanlagen systematisch und ausführlich hinsichtlich der praktischen Anwendung erforscht und mehrfach publiziert. Dabei wurden nicht nur technische sondern auch normative und rechtliche Anforderungen berücksichtigt, sodass keine Komplikationen bei der Zulassung im Rahmen der Typprüfung auftreten sollten. Außerdem wurde dabei eine verfahrenstechnische Grundlage zur Auslegung der Einbautentechnik mit den wichtigsten Empfehlungen zum Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen entwickelt und beispielhaft (Abschnitt 4.6.6) dargestellt. Durch diese besondere Vorgehensweise wird der Einsatz der Einbautentechnik in vielen kleinen und mittleren Unternehmen ermöglicht. Hierzu sind keine besonderen Fachkenntnisse notwendig.

Die Einbautentechnik hat sowohl bei den beteiligten Industriepartnern, als auch bei anderen Unternehmen eine breite Anerkennung gefunden und wurde bereits mehrfach eingesetzt. Gemäß dem Lizenzmodell des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP darf die Einbautentechnik von allen interessierten Unternehmen ohne jegliche Einschränkung oder Monopolisierung eingesetzt werden, sodass eine breitere Anwendung dieser technisch einfachen innovativen Technik in der Praxis erreicht werden kann. Die mehrfache Publizierung der im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Forschungsergebnisse hat mehreren Unternehmen, wie z. B. die Firma Kamin Schmid Feuerungstechnik GmbH sowie AMBIO Speicherofen & Speicherkamin GmbH ermöglicht, die Einbautentechnik spezifisch für den Einsatz in ihren Feuerungsanlagen erfolgreich zu entwickeln und zu vermarkten. Dank der Einbautentechnik konnten die erforderlichen Grenzwerte bei komplizierten Einzelraumfeuerungsanlagen eingehalten sowie die Verbrennungseffizienz bedeutsam gesteigert werden.

Die Firma Mayr Heiz- und Energietechnik hat einen Prototyp eines Kamineinsatzes gemäß DIN EN 13290 mit der Einbautentechnik selbst entwickelt und erfolgreich getestet. Trotz komplizierter Bauform (Tunnelsystem mit zwei Glasscheiben und Türen) wurden die Anforderungen der 1. BImSchV an Emissionen sowie an der Effizienz ohne Probleme erfüllt. Dabei wurden Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid von kleiner als 670 mg/Vm^3 sowie an Gesamtkohlenwasserstoffen von kleiner als 38 mg/Vm^3 eingehalten. Die Staubkonzentrationen waren niedrig und lagen deutlich unter 17 mg/Vm^3 . Beim Betrieb war der Wirkungsgrad mit 85 % besonders hoch. Die Firma Mayr Heiz- und Energietechnik plant, den Prototyp gemäß

DIN EN 13229 bei einer unabhängigen Prüfstelle zu prüfen und auf dem Markt zu bringen.



Abbildung 15: Praktisches Anwendungsbeispiel der Einbautentechnik von der Firma Schmid und Camina [k & L Magazin 2/2016]

Kamineinsatz der Firma Mayr Heiz- und Energietechnik



Einbautenmodul

Abbildung 16: Prototyp des Kamineinsatzes der Firma Mayr Heiz- und Energietechnik.

Die Einbautentechnik lässt sich nicht nur in Einzelraumfeuerungsanlagen sondern auch in automatischen und handbeschickten Heizkesseln unabhängig von der thermischen Leistung einsetzen. Dabei weist die Einbautentechnik eine optimale Funktion zur Schadstoffminderung und Betriebsstabilisierung aufgrund eines geregelten Verbrennungsprozesses auf. Die im Abschnitt 4 dargestellte verfahrenstechnische Grundlage für die Auslegung der Einbautentechnik gilt auch für Heizkessel. Der maximal zulässige Druckverlust beim Einsatz der Einbautentechnik in Heizkesseln hängt von der Leistung des Saugzuggebläses ab. Bei den herkömmlichen automatisch geregelten Heizkesseln darf die Einbautentechnik für einen maximalen Druckverlust von 300 Pascal ausgelegt werden.

9 Entwicklung neuartiger Einbauten

Für eine optimale Funktion der Einbautentechnik sind nicht nur das Material sondern auch die Konstruktion sowie die Architektur des Einbaus von großer Bedeutung. Auf Basis der erworbenen Erfahrungen mit dem Betrieb der Einbautentechnik in unterschiedlichen Einzelraumfeuerungsanlagen wurde ein spezieller Einbau (der sogenannte Zyκλο-Turbo-Einbau) konzeptioniert und technisch dank der 3D-Druckertechnik realisiert bzw. angefertigt. Abbildung 17 zeigt ein Beispiel für den entwickelten Zyκλο-Turbo-Einbau mit der verwendeten Gussform.



Abbildung 17: Beispiel für einen Zyκλο-Turbo-Einbau (links), Innengussform (rechts).

Zur Herstellung des Zyκλο-Turbo-Einbaus wird mit Hilfe eines 3D-Druckers die Innengussform (schwarze Spirale, Abbildung 17, rechts) aus Kunststoff gedruckt. Aus dieser Form wird ein spezielles betonartiges Material gegossen,

sodass ein quadratischer Einbau gefertigt wird. Die gegossene Masse wird anschließend für eine gewisse Zeit (ca. 24 Stunden) bei Raumtemperatur (ca. 25 °C) getrocknet, bevor die Spirale ausgedreht bzw. abgenommen und wiederverwendet wird. Nach der Abnahme hinterlässt die abgenommene Spirale einen spiralförmigen Abgaszug mit sehr rauer Oberfläche, in der das Abgas stark turbuliert und über längere Zeit zirkuliert wird. Das verwendete Material weist eine hohe spezifische Wärmekapazität sowie eine hohe thermische und mechanische Stabilität auf und gewährleistet eine starke Wärmestrahlung und Wärmeabgabe während des Betriebs, sodass die Oxidation der brennbaren Bestandteile gewährleistet werden kann. Die Vorteile des Zyκλο-Turbo-Einbaus gegenüber den metallischen und keramischen Pall-Ringen liegen an der deutlichen Verlängerung der aktiven Verweilzeit sowie an der effektiven mechanischen Abscheidung grober Stäube durch die Fliehkraft. Die Feinstäube werden bei der Durchströmung in den Einbau in Richtung der Einbauwände geschleudert und haften dort an der rauen Oberfläche an bzw. werden beim Erreichen ausreichend hoher Temperaturen verbrannt. Außerdem kann das Einbautenmodul aus einem einzigen Einbau mit entsprechender technischer Ausführung gefertigt werden. Dadurch kann es leichter angepasst und in die Feuerungsanlage integriert werden (Abbildung 18).

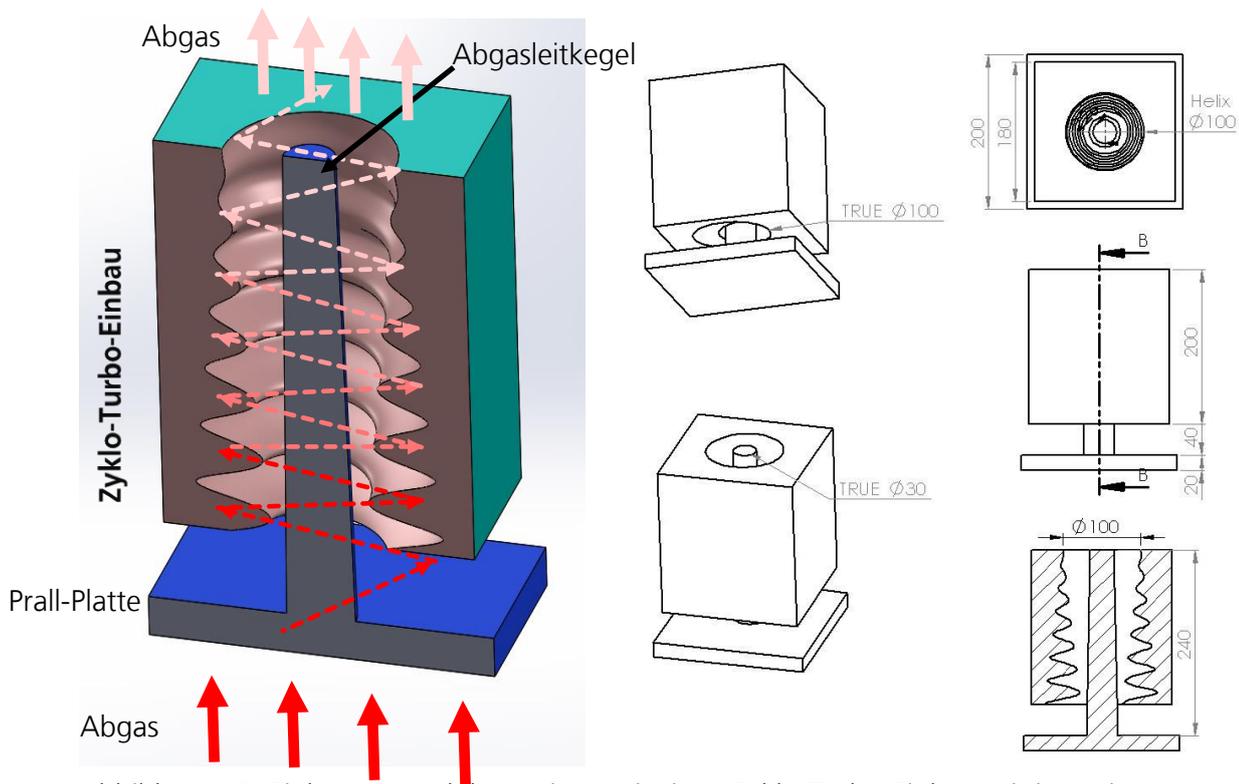


Abbildung 18: Einbautenmodul aus einem einzigen Zyκλο-Turbo-Einbau mit integrierter Abgasprallplatte und Abgasleitkegel, Dimensionen sind in Millimeter angegeben.

Der Zyκλο-Turbo-Einbau wurde bisher auf die Funktion nicht getestet. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP plant, diesen innovativen Einbau mit den günstigen technischen Ausführungen in weiteren Projekten zu untersuchen und weiterzuentwickeln.

Zusammenfassung und Ausblick/ Summary and Outlook

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde eine neuartige (sogenannte Einbautentechnik oder Füllkörpertechnik) zur Schadstoffminderung und Effizienzerhöhung für den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen, unter Berücksichtigung normativer Anforderungen, erfolgreich erforscht. Diese innovative Technik wurde zuerst vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP erfunden und international anhand entsprechender Patentanmeldungen geschützt. Da die Einbautentechnik sowohl zur Abscheidung von Feinstaub als auch zur Oxidation von brennbaren gasförmigen Bestandteilen beiträgt, wird diese auch als Filter-Reaktor-System bezeichnet.

Das Wirkungsprinzip der Einbautentechnik beruht auf der Bereitstellung günstiger Oxidationsbedingungen während der Verbrennung innerhalb eines definierten Einbautenmoduls. Dieses Modul speichert während der Verbrennung ausreichend Energie in Form von Wärme und stellt sie automatisch beim Abfall der Temperaturen unter einer bestimmten Grenze (Abgastemperatur < Modultemperatur) während der Verbrennung für die thermische Oxidation zur Verfügung. Durch seine spezielle Architektur gewährleistet das Einbautenmodul eine intensive Durchmischung der brennbaren Abgasbestandteile mit der Verbrennungsluft sowie eine Verlängerung der aktiven Verweilzeit durch eine Mehrfachumlenkung bzw. Verwirbelung der Abgase. Die gespeicherte Wärme soll die Oxidation nicht verbrannter Bestandteile im Abgas in den ungünstigen Betriebsphasen ermöglichen, wie z. B. beim Auflegen von Holz, ermöglichen sowie zu einem stabilen Verbrennungsvorgang unabhängig von der Dynamik des Verbrennungsprozesses führen. Die Steigerung der Effizienz bei der Einbautentechnik ergibt sich aus der Reduzierung der Wärme- sowie der chemischen Verluste im Abgas bei ungünstigen Einstellungen und Druckverlusten. Generell kann die Verbrennung beim Einsatz der Einbautentechnik mit deutlich geringerem Luftüberschuss betrieben werden als ohne Einbautentechnik, wodurch die Effizienz der Verbrennung merkbar ansteigt.

Zur Herstellung des Einbautenmoduls wurden keramische (50 mm) und metallische Pall-Ringe (35 mm) verwendet, welche im Modul so angeordnet werden, dass eine deterministische Struktur aufgebaut werden kann. Das Potential dieser Einbauten (Pall-Ringe) mit der geeigneten Art der Struktur zum sicheren und effizienten Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen, wurde im Rahmen eines vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP durchgeführten Projekts festgestellt, welches von der deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wurde [Aleysa et al. 2015]. Nicht deterministische Strukturen wie z. B. Schüttungen, Schaumstrukturen und Drahtgestrickt sollten aufgrund der unkontrollierten Druckverlustentwicklung während ungünstiger Betriebsphasen in Einzelraumfeuerungsanlagen nicht eingesetzt werden.

Zur Ermittlung der praktischen Umsetzbarkeit der Einbautentechnik wurden zwei unterschiedliche Anlagentypen von Einzelraumfeuerungsanlagen eingesetzt, welche alle bekannten Typen von Einzelraumfeuerungsanlagen

repräsentieren. Bei dem ersten Anlagentyp handelt es sich um Feuerungsanlagen mit einer schnellen Wärmeabgabe in den Aufstellraum, wie beispielsweise freistehende Raumheizer gemäß DIN EN 13240 sowie Kamineinsätze und offene Kamine gemäß DIN EN 13229, welche alle 35 Minuten bis 60 Minuten mit Holz beschickt werden müssen, um den Wärmebedarf zu decken. Zum anderen Anlagentyp gehören Feuerungsanlagen mit einer langsamen Wärmeabgabe im Aufstellraum, wie zum Beispiel Grundöfen und Speicheröfen gemäß DIN EN 15250. Diese Feuerungsanlagen werden täglich bis 150 Minuten mit einer bestimmten Holzmenge, gemäß der Herstellerangaben betrieben und die Wärme über den gesamten Tag langsam in den Aufstellraum abgeben.

Die Umsetzbarkeit der Einbautentechnik wurde unter praktischen und betrieblichen Einsatzbedingungen ermittelt und bewertet. Dabei wurden experimentelle Untersuchungen zum Verbrennungsverhalten, zum strömungstechnischen Verhalten, zur Effizienz und zum Emissionsverhalten bei unterschiedlichen praxisrelevanten Einstellungen durchgeführt. Zu diesen Einstellungen gehören die Variationen der wichtigsten Betriebsparameter (Förderdruck, Brennstoffmasse, Anzahl der Scheite usw.), welche die Verbrennungsqualität hinsichtlich der Schadstoffemissionen sowie der Verbrennungseffizienz in der Praxis beeinflussen können.

Durch den Einsatz der Einbautentechnik wurde ein stabiles Verbrennungsverhalten, unabhängig von der Bedienungsqualität und den eingestellten Betriebsparametern, unter praktischen Einsatz-, und Betriebsbedingungen erreicht. Die Messergebnisse der staub- und gasförmigen Emissionen (Kohlenstoffmonoxid, Gesamtkohlenwasserstoffe und Staub) sowie des Wirkungsgrades aus unterschiedlichen Abbränden sowie Betriebstagen konnte mit höherer Wiederholbarkeit sowie Reproduzierbarkeit ermittelt werden als beim Betrieb ohne Einbautentechnik. Für eine Funktion der Einbautentechnik sind ein funktionsfähiges Verbrennungskonzept sowie ein richtig ausgelegtes Verbrennungsluftzufuhrsystem nötig.

Die Verbesserung des Verbrennungsverhaltens und Gewährleistung eines stabilen Betriebs beim Einsatz der Einbautentechnik hat zu einer ausschlaggebenden Reduzierung der staub- und gasförmigen Emissionen in den beiden eingesetzten Einzelraumfeuerungsanlagentypen geführt (Abschnitt 6.1). Bei den beiden eingesetzten Typen der Einzelraumfeuerungsanlagen wurde Kohlenstoffmonoxid im Mittel um bis zu 78 % sowie die Gesamtkohlenwasserstoffe um bis zu 95 % im Abgas reduziert. Eine bedeutsame Minderung von staubförmigen Emissionen (Fein- und Feinstaub) wurde dank der Filter-Reaktor-Funktion der Einbautentechnik ebenso erreicht. Gesundheitsgefährdende Feinstäube ließen sich problemlos um bis zu 86 % mindern. Diese Reduzierungen von staub- und gasförmigen Emissionen sind bei allen Typen der Einzelraumfeuerungsanlagen (Einzelraumfeuerungsanlagen mit einer schnellen sowie einer langsamen Wärmeabgabe in den Aufstellraum) mit hoher Reproduzierbarkeit sowie Wiederholbarkeit unter praktischen Einsatz- und Betriebsbedingungen bzw.

bei der Variation des Förderdrucks sowie des Beschickungsregimes (Scheitanzahl, Brennstoffmasse) zu gewährleisten. Ein besonderer Vorteil der Einbautentechnik ist die natürliche und nachhaltige Funktion der Oxidation ohne jegliche katalytische Beschichtung. Ein Alterungsverhalten wird in keiner Art und Weise auftreten können.

Zusätzlich zu einer bedeutsamen Minderung der staub- und gasförmigen Emissionen ist durch die Einbautentechnik eine bedeutsame Verbesserung der Effizienz zu erreichen. Diese Verbesserung der Effizienz beim Einsatz in freistehenden Raumheizern gemäß DIN EN 13240 war deutlicher zu bemerken als beim Einsatz in Speicherfeuerstätten gemäß DIN EN 15250. Beim Betrieb des freistehenden Raumheizers wurde eine minimale Wirkungsgradsteigerung von 3,5 % erreicht. Diese minimale Steigerung des Wirkungsgrades ist bei vielen Feuerungsanlagen gemäß DIN EN 13240 sowie gemäß DIN EN 13229 zu erwarten. Eine Erhöhung des Wirkungsgrades auf bis zu 88 % ist bei solchen Feuerungsanlagentypen dank der Einbautentechnik möglich. Speicherfeuerstätten haben in der Regel bei einer ausreichenden Speichermasse einen hohen Wirkungsgrad von bis zu 92 %. Die Verbesserung der Effizienz beim Einsatz der Einbautentechnik ergibt sich aus der Verbesserung der Oxidation der energiereichen Bestandteile (wie z. B. CO, C_nH_m und Ruß). Der Verbesserungseffekt durch die kontrollierte Wärmeabgabe sowie durch die Erhöhung der Speichermasse ist zwar gegeben, aber relativ gering im Vergleich zu der gesamten Speicherkapazität der Speichermasse (bis 1.500 kg) der Speicherfeuerstätte.

Ein besonderer Vorteil der Einbautentechnik beim Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen beruht auf dem niedrigen Strömungswiderstand bzw. Druckverlust von kleiner als 2 Pascal, welcher sich im Dauerbetrieb (über mehrere tausend Betriebsstunden) konstant und unabhängig vom Brennstoff sowie der Bedienungsqualität verhält. Eine Verblockung des Einbautenmoduls und somit das Austreten gefährlicher Abgase in den Aufstellraum während des Betriebs ist definitiv auszuschließen. Dank der günstigen Struktur ist die Reinigung des Einbautenmoduls oder der Austausch während der Nutzung nicht notwendig. Die verwendeten Materialien (hochtemperaturbeständige Keramik oder Edelstahl) der Einbautenmodule weisen in der Regel eine hohe, mit dem Material der Feuerstätten vergleichbare Lebensdauer auf.

Zusätzlich zu einer ausführlichen und systematischen Erforschung der Einbautentechnik wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts die verfahrenstechnische Grundlage bzw. eine zuverlässige und für praktische Zwecke hinreichend genaue Methode zur Auslegung der Einbautentechnik entwickelt, welche ausführlich im Abschnitt 4.6 dargestellt wird. Diese Methode wurde mit Hilfe eines Abgassimulators sowie des Betriebs mehrerer mit der Einbautentechnik ausgerüsteter Einzelraumfeuerungsanlagen validiert. Die Validierung wurde nur für keramische (50 mm) sowie metallische (35 mm) Pall-Ringe durchgeführt, welche in diesem Forschungsprojekt verwendet wurden.

Die Einbautentechnik weist eine hohe Umsetzbarkeit in der Praxis auf. Dank der flexiblen Modulbauweise lässt sich diese Technik in allen Einzelraumfeuerungsanlagen ohne großen technischen Aufwand sowie ohne Bedarf an speziellen Fachkompetenzen oder der Notwendigkeit für teure, auf dem deutschen Markt nicht verfügbaren Baumaterialien integrieren, wodurch sie von vielen kleinen und mittleren Unternehmen eingesetzt werden kann. Aufgrund der sehr niedrigen Anschaffungs- und Betriebskosten, der nachhaltigen Funktion sowie des wartungs- und pflegearmen Betriebs ist die Einbautentechnik als besonders wirtschaftlich und nachhaltig zu bezeichnen. Der ökologische Beitrag der Einbautentechnik ergibt sich aus der Brennstoffersparnis aufgrund der Effizienzerhöhung sowie aus der bedeutsamen Minderung der staub- und gasförmigen Emissionen im Praxisbetrieb.

Dank der technischen, ökonomischen und ökologischen Vorteile der Einbautentechnik hat sie große Akzeptanz in der Branche der Kleinfeuerungsanlagen erlangt und wurde bereits mehrfach verwendet. Diese innovative zukunftssträchtige Technik ist nicht nur für den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen sondern auch für den Einsatz in automatischen und handbeschickten Heizkesseln geeignet und weist bei diesen, aufgrund eines geregelten Verbrennungsprozesses, eine optimale Funktion auf. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP strebt an, die Einbautentechnik technisch durch die Entwicklung effizienterer Einbauten sowie für weitere Anwendungen in Kleinfeuerungsanlagen der 1. BImSchV weiter zu entwickeln.

Summary and Outlook

In the scope of this research, considering the relevant standardized requirement, a new (so-called Internals Technology) system was successfully investigated for the use in the small, single-room combustion plants with the aim of reducing pollutants and enhancing efficiency. This innovative technology has been first or developed by Fraunhofer Institute for Building Physic IBP and protected by the appropriate international patent applications. Since these Internals Technology contributes to the separation effect of fine particles as well as the oxidation of combustible gaseous components, it can be described as Filter-Reactor-System.

The effect principle of this Internals Technology is based on providing the appropriate oxidation conditions within the defined installation modules during combustion. During the combustion, these modules store enough energy in the form of heat and then provide it automatically for the thermal oxidation when the temperature falls down under certain limits (exhaust gas temperature < module temperature). The special architecture of the Internals module ensures the intensive mixing of the combustible exhaust components with the combustion air as well as extending the residence time through increasing the deflections and the turbulent of exhaust gases. The stored heat should enable the oxidation of unburned exhaust gas components in the unfavored phases (for example, feeding the wood logs) and also ensure a

stable combustion process independently of the dynamic of the combustion process. Increasing the efficiency of the Internals Technology is the result of reducing heat and chemical losses in the exhaust gases during the unfavoured settings and pressure losses. In general, the combustion with the Internals Technology can be operated with a considerable low excess of air, whereby a significant increase of the combustion efficiency can be noticed when compared to processes without Internals Technology. For manufacturing the Internals Technology, ceramic (50 mm) and metallic (35 mm) Pall-Rings are used, which are so arranged that a deterministic structure of a module can be built. In the frame of a project carried out by Fraunhofer Institute for Building Physic IBP and funded by the German Federal Environmental Foundation (DBU), the potential of these Internals (Pall-Rings) with the appropriate type of structure for safe and efficient use in the small, single-room combustion plants was determined [Aleysa et al. 2015]. Non deterministic structures such as metallic und ceramic structured packing and foam structures should not be used due to the uncontrolled increase of pressure drop during the unfavored operating phases in single room firing appliances. To determine the practical feasibility of the Internals Technology, two different system types of single room firing systems were used, which represent the most known single room combustion plants. The first type of system is a firing combustion system with rapid heat dissipation in the installation room, such as free-standing room heater according to DIN EN 13240 with chimney inserts and the open fireplaces (chimneys) according to DIN EN 13229. Room heaters must be charged with wood every 35 to 60 minutes according to the heat demand. The other type is a combustion system with slow heat dissipation in the installation room, such as masonry heaters and storage heaters in accordance to DIN EN 15250. In accordance with the manufacturer's instructions, these furnaces are operated daily for 150 minutes with a certain amount of wood and then they slowly release the heat in the installation room over the entire day.

The feasibility of the Internals Technology was determined and evaluated under practical and operational working conditions. In these experimental investigations, the combustion behavior and characteristics, the aerodynamic characteristics, efficiency and emission behavior were investigated at different practice-relevant settings. These setting including varying the main operating parameters (feed pressure, fuel mass, number of logs, etc.), may affect in practice the combustion quality concerning pollutant emissions and combustion efficiency.

By using the Internals, a stable combustion behavior has been achieved independent of the operation conditions and the set operating parameters during the practical use- and operating conditions. The measurement results of dust and gaseous emissions (carbon monoxide, total hydrocarbons and dust) as well as the efficiency of different burn-ups over days of operation have been identified with higher repeatability and reproducibility. For the function of Internals Technology, a functioning combustion concept and a properly designed system of combustion air supply are needed.

Improving the combustion behavior and ensuring a stable operation when using the Internals Technology have led to a decisive reduction of dust and gas emissions in both types of small, single-room firing systems used (Section 0). In which, carbon monoxide was reduced to 78% and the total hydrogen to 95 %. A significant reduction of dust emissions (fine dusts) were achieved, thanks to the filter-reactor function of the Internals Technology as well. Harmful fine dusts were easily reduced to 86 %. These reductions of dust and gaseous emissions can be ensured for all types of small, single- room firing installations (with a fast or slow heat release) with high reducibility and repeatability during the practical use or by varying feed pressures and wood feeding regimes (logs numbers, fuel masses). A particular advantage of these Internals is that, the natural and long-lasting function of oxidation is to be ensured without any catalytic coating. Besides, ageing behavior may not occur.

In addition to the significant reduction of dust and gaseous emissions by using Internals Technology, a significant improvement in efficiency has been achieved. This improvement in efficiency was more noticeable by free-standing room heaters (DIN EN 13240) than storage heating appliances (DIN EN 15250). By free-standing room heater, a minimal increase in efficiency of 3.5 % was achieved. This minimal increase in efficiency can be expected in many small combustion plants of (DIN EN 13240 and DIN EN 13229). Increasing the efficiency up to 88% in such types of small combustion systems is possible by using the Internals Technology. Usually, storage heaters reach, with enough heat storage masses, high efficiency level (up to 92%). Enhancing the oxidation of energy-containing components (such as: CO., C_nH_m and soot) by using the Internals Technology leads to increasing the efficiency. There is an improvement effect by controlling heat release as well as by increasing heat storage masses but it is relative low compared to the total heat storage capacity of the large heat masses (up to 1,500 kg) of storage heaters.

A particular advantage of the Internals Technology in single room combustion systems is the low pressure drop of less than 2 Pascal. This pressure stays constant even during continuous operation (over several thousands of operation hours) irrespective of the fuel quality and the operation conditions. Additionally, clogging of the Internals module and thus occurrence of hazardous gases in the installation room during operation is definitely ruled out. Due to the convenient structure, cleaning or changing the Internals module during use is not necessary. The materials used (high-temperature resistant ceramic or stainless steel) of the Internals modules generally have a long service time when compared to the material of the combustion systems.

In addition to the detailed and systematic investigation of the Internals technology, a procedural basis as well as a reliable and sufficiently accurate method for practical purposes and designing of the Internals Technology was developed and described in detail in Section 4, as a part of this research project. This method was validated with the help of an exhaust gas simulator as well as by testing several small, single- room firing systems equipped with

the Internals Technology. The validation has been carried out for ceramic (50 mm) and metallic (35 mm) pall rings.

The Internals Technology shows in practice high degree of feasibility. Thanks to the flexible modular design, this technique can be integrated, in all single room firing appliances, without great technical effort or a special expertise or even the need for expensive construction materials, which may not be available on the German market. All these enable it to be perceived in many small and medium enterprises. Moreover, due to the very low cost of ownership, long-life function and the easy care and maintenance, this Internals technique is to be designated as a special economic and sustainable method.

The ecological contribution of Internals Technology arises from the fuel economy due to the efficiency increase and the significant reduction of dust and gaseous emissions in the practical operation.

As a result, this Internals Technology has been already used and also gained wide acceptance in small combustion sector, thanks to the technical, economic and environmental benefits of these Internals. This innovative, promising technology is not only suitable for the use in single room firing appliances but also for automatic- and manually operated boilers. In this context, this technology has showed an optimal function under a controlled combustion process. Lastly, Fraunhofer-Institute for Building Physics IBP aims to develop the Internals Technology technically by developing more efficient Internals for more applications in more small combustion systems of 1. BImSchV (Federal Emission Protection Act).

Literaturverzeichnis

- Aleysa, M.; Weclas, M.; Leistner, Ph.: Korrelation der Filter-Reaktor-Architektur mit thermophysikalischen Funktionsbedingungen zur Erforschung und Entwicklung eines nicht-katalytischen 3D-porösen Filter-Reaktor-System für biomassebetrieben Kleinf Feuerungsanlagen, Abschlussbericht eines von der deutschen Bundesstiftung (DBU) geförderten Projekts mit dem AZ 30550, Stuttgart 2015, 59 S.
- Bundesumweltministerium (BMU): Kleinf Feuerungsanlagen, Gesundheitliche Wirkung von Feinstäuben aus der Holzverbrennung, Bonn 2007, 4 S.
- Beebe, R. A.; Fricke, Griffith, R. H.; Hunsmann, W.; Kohlschutter, H. W.; Straumanis, M.: Heterogene Katalyse I, ISBN-10: 3642520359, ISBN-13: 978-3642520358, Springer Verlag, 568 S.
- Fuhrmann, G. F.: Allgemeine Toxikologie für Chemiker, Teubner Studienbücher Chemie, 2. Auflage, Leipzig 1999, 206 S.
- Guderian, R.: Handbuch der Umweltveränderung und Ökotoxikologie, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999, 424 S.
- Janbozorgi, M.; Eisazadeh Far K.; Metghalchi, H.; Handbook of Combustion Vol.I, Fundamentals and Safety, Edited by Maximilian Lackner, Franz Winter, and Avinash K. Agarwal Copyright _ 2010 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2010, ISBN: 978-3-527-32449-1, 2698 S.
- Joos, F.: Technische Verbrennung, Springer-Verlag, 1. Auflage, Berlin-Heidelberg 2009, 1030 S.
- Hesselbach, J.: Vorlesungsskript LCE, Universität Kassel Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse, Kassel 2010
- Kaltschmitt, M.; Hartmann, H., Hofbauer, H. Energie aus Biomasse, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2009, 1030 S.
- Klippel, N.; Nussbaumer, Th.: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub in Vergleich zu Dieselruß, 9. Holzsymposium, Zürich 2006, S. 21-40.
- Lullmann, H.; Mohr, K.; Wehling, M.: Pharmakologie und Toxikologie, 15. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2003, 595 S.
- Marztzky, R; Seeger, K.: Energie aus Holz und anderer Biomasse, DRW-Verlag, Stuttgart 2002, 352 S.
- Mortimer Ch. E.; Müller, U.: Chemie – Das Basiswissen der Chemie, 8. komplett überarbeitete und erweiterte Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2003, ISBN 3-13-484308-0, 750 S.
- K & L Magazin, Fachzeitschrift für Ofen- und Luftheizungsbau, Schmidt/Camina, K&L Magazin 2/2016 (2016), Seite 33.

- Reuter-Hack, K.: Hochtemperaturaufladung von gasgetragenen Partikelsystemen, KIT Scientific Pub., Karlsruhe 2011, 151 S.
- Schultes, M.: Abgasreinigung, Verfahrensprinzipien, Berechnungsgrundlagen, Verfahrensvergleich, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, 243 S.
- Schwister, K.: Taschenbuch der Umwelttechnik, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, Leipzig 2009, 501 S.
- Urban, A.: Energetische Verwertung von Abfällen, Vorlesungsskript des Fachgebiet Abfalltechnik der Universität Kassel, WS 2008/2009
- Erste Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV), Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen vom 26. Januar 2010 (BGBl. I S. 38), Ausfertigungsdatum: 26.01.2010.
- DIN EN 303-5 - Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW – Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung; Deutsche Fassung EN 303-5:2012, Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik, Beuth Verlag GmbH, 81 S.
- DIN EN 13240 - Raumheizer für feste Brennstoffe – Anforderungen und Prüfungen, Deutsche Fassung EN 13240:2001 + A2:2004, Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik, Beuth Verlag GmbH, 78 S.
- DIN EN 13229 - Kamineinsätze einschließlich offene Kamine für feste Brennstoffe Anforderungen und Prüfungen; Deutsche Fassung EN 13229:2001 + A1:2003 + A2:2004, Beuth Verlag GmbH, 88 S.
- DIN EN 15250 - Speicherfeuerstätten für feste Brennstoffe –Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 15250:2007, Beuth Verlag GmbH, 62 S.
- DIN EN 14785 - Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets –Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 14785:2006, Beuth Verlag GmbH, 72 S.
- DIN 12815 - Herde für feste Brennstoffe - Anforderungen und Prüfungen; Deutsche Fassung EN 12815:2001 + A1:2004, Beuth Verlag GmbH, 84 S.
- DIN EN ISO 17043 - Konformitätsbewertung – Allgemeine Anforderungen an Eignungsprüfungen (ISO/IEC 17043:2010); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17043:2010, Beuth Verlag GmbH, 89 S.
- DIN ISO IEC 17025 - Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2005, B.