

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP

**KORRELATION DER FILTER-REAKTOR-ARCHITEKTUR MIT  
THERMOPHYSIKALISCHEN FUNKTIONSBEDINGUNGEN ZUR  
ERFORSCHUNG UND ENTWICKLUNG EINES NICHT-  
KATALYTISCHEN 3D-PORÖSEN FILTER-REAKTOR-SYSTEMS  
FÜR BIOMASSEBETRIEBENE KLEINFEUERUNGSANLAGEN**

**ABSCHLUSSBERICHT ÜBER EIN FORSCHUNGSPROJEKT GEFÖRDERT VON DER  
DEUTSCHEN BUNDESSTIFTUNG UMWELT MIT DEM AZ: 30550**

Dr.-Ing. Mohammad Aleya

Prof. Mirosław Weclas

Prof. Dr. Philip Leistner

Stuttgart, Juli 2015

11/99

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



AZ	<b>30550</b>	Referat	<b>21/0</b>	Fördersumme	<b>170.002,00 €</b>
----	--------------	---------	-------------	-------------	---------------------

**Antragstitel** **Korrelation der Filter-Reaktor-Architektur mit thermophysikalischen Funktionsbedingungen zur Erforschung und Entwicklung eines nicht-katalytischen 3D-porösen Filter-Reaktor-Systems für biomassebetriebene Kleinfeuerungsanlagen**

**Stichworte** Verfahren  
Abgas

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>2 Jahre</b>	<b>22.11.2012</b>	<b>25.11.2014</b>	<b>1</b>

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP Institutsteil Stuttgart Abteilung Energiesysteme  Nobelstr. 12 70569 Stuttgart	Tel 0711 970 3455 Fax 0711 970 3400  Projektleitung Prof. Dr. M. Weclas Dr.-Ing. Aleya  Bearbeiter/Autor Dr.-Ing. Aleya
------------------------------	---	---

**Kooperationspartner** Es sind keine Kooperationspartner an diesem Projekt beteiligt. Dieses Projekt wurde ausschließlich durch die Gruppe Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP geleitet und durchgeführt.

**Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Handbeschickte biomassebetriebene Einzelraumfeuerungsanlagen stellen eine nicht zu vernachlässigende Quelle für viele staub- und gasförmige Emissionen dar. Die in Wohngebieten am meisten verbreiteten Kleinfeuerungsanlagen haben eine thermische Nennwärmeleistung von weniger als 15 kW. Tendenziell sollen immer mehr Kleinfeuerungsanlagen mit einer thermischen Leistung kleiner als 15 kW aufgrund zunehmender Zahlen an Passiv- und Niedrigenergiehäusern sowie durch die energetische Sanierung bestehender Gebäude zum Einsatz kommen. Die Verbesserung der Verbrennung in diesem Leistungsbereich der Kleinfeuerungsanlagen soll zu einer signifikanten Reduzierung der Schadstoffemissionen in Wohngebieten sowie zum aktiven Umwelt- und Klimaschutz führen.

Diese umweltbelastenden und gesundheitsgefährdenden Schadstoffe aus handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen bestehen zu einem großen Teil aus brennbaren Komponenten, die sich thermisch oder katalytisch behandeln lassen. Thermische Oxidationsverfahren arbeiten sicherer und nachhaltiger als die katalytischen Oxidationsverfahren und lassen sich wirtschaftlicher und umweltfreundlicher in die handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen integrieren. Bezüglich des Einsatzes in Einzelraumfeuerungsanlagen sollen thermischen Oxidationsverfahren sowohl als Filter als auch als Reaktor agieren. Sie werden in diesem Projekt als Filter-Reaktor-System bezeichnet. Bei der Funktion der Thermischen Oxidationsverfahren spielt die Architektur der eingesetzten Struktur eine entscheidende Rolle.

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Korrelation zwischen der Architektur von dreidimensionalen Strukturen und der Filtrations- und Oxidationsleistung von staub- und gasförmigen Emissionen bezüglich des Einsatzes in biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen erforscht und Empfehlungen für die Umsetzbarkeit der Filter-Reaktor-Techniken bzw. -Systeme in der Praxis erarbeitet. Die erhaltenen Ergebnisse und erworbenen Erfahrungen sollen als Basis für die Auslegung solcher Technologien dienen.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Der Ansatz des Fraunhofer IBP zur nachhaltigen Emissionsminderung in Kleinfeuerungsanlagen beruht darauf, dass die Minderung der Schadstoffemissionen im Feuerraumbereich in der thermisch aktiven Zone und vor der Wärmeabgabe erfolgt und dort beendet werden soll. Die bei der Verbrennung entstehende Wärme soll so verwaltet werden, dass sie für die Oxidation eingesetzt und anschließend effizient ohne jegliche Verluste genutzt werden kann. Das Wirkungsprinzip der in den Feuerraum integrierten thermischen Oxidationsverfahren 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 Hochtemperaturspeichermodul 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 ermöglichen, wie z. B. beim Auflegen von Holz, und zu einem stabilen Betrieb während des ganzen 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.

Zur Entwicklung solcher integrierter Schadstoffminderungsmaßnahmen ist eine spezielle technische Einrichtung notwendig, welche die Nachbildung des Abgases aus der Verbrennung von Biomasse sowie die Einstellung definierter Betriebsbedingung bzw. physikalische, chemische und thermodynamische Parameter ermöglicht. Diese Einrichtung (Abgassimulator) wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelt und für die Ermittlung der Korrelation zwischen der Reaktorarchitektur und der Filtrations- und Oxidationsleistung bei der thermischen Behandlung von staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen in biomassebetriebenen Kleinfeuerungsanlagen eingesetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Typen von Strukturen, deterministische und nicht-deterministische, bezüglich des Einsatzes in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen nach dem aerodynamischen und Beladungsverhalten sowie nach der Filtrations- und Oxidationsleistung für staub- und gasförmige Schadstoffemissionen bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Architektur der Struktur einen wesentlichen Einfluss auf die Schadstoffminderungen sowie Effizienzerhöhung hat. Deterministische Strukturen agieren bei ausreichend hohen Temperaturen sowohl als Reaktor als auch als Filter und lassen sich sicher ohne technische Komplikationen im Praxisbetrieb in Einzelraumfeuerungsanlagen einsetzen. Nicht-deterministische Strukturen funktionieren mehr als Filter (integrierter Staubabscheider) als als Reaktor. Aufgrund schneller Entwicklung des Druckverlustes beim Auftreten ungünstiger Betriebszustände sollten die nicht-deterministischen Strukturen in Einzelraumfeuerungsanlagen nicht eingesetzt werden, da sowohl eine hohe Umweltbelastung als auch eine besonders große Gefährdung der Nutzer auftreten kann. Deterministische Strukturen agieren sowohl als Filter und als auch Reaktor. Da die Reduktion der brennbaren Bestandteile ausschließlich durch die thermische Behandlung (Oxidation) erfolgt und nicht durch die mechanische Abscheidung wie bei nicht-deterministischen Strukturen, gibt es keine Probleme mit der Erhöhung des Druckverlustes im Praxisbetrieb.

Die Untersuchungen dieses Projektes wurden unter reproduzierbaren definierten Bedingungen durchgeführt. Da beim Betrieb von Einzelraumfeuerungsanlagen ganz andere Betriebs- und Rahmenbedingungen (Temperatur, Schadstoffbelastung, Abgasvolumenstrom usw.) herrschen, sollten die erhaltenen Kenntnisse und Ergebnisse in einer realen Forschungsfeuerstätte bei der Verbrennung unterschiedlicher Hölzer validiert werden. Diese Forschungsfeuerstätte soll die genauen Einstellungen sowie 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. an die Türscheibe als Scheibenspülluft, durch den Verbrennungsrost, durch die Wände der Feuerstätten kalt oder vorgewärmt und geregelt zugeführt werden. Die Entwicklung dieser Forschungsfeuerstätte mit den dazugehörigen Validierungsuntersuchungen kann im Rahmen weiterer Forschungsprojekte mit der Teilnahme interessierter Industriepartner erfolgen.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt,  
An der Bornau 2, 49090 Osnabrück  
Tel 0541/9633-0  
Fax 0541/9633-190  
<http://www.dbu.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Wissenschaft und der Technik</b>	<b>12</b>
2.1	Kleinf Feuerungsanlagen der 1. BImSchV	12
2.2	Problematik in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen	14
2.3	Integrierbare Technologien zur Abgasbehandlung in Kleinf Feuerungsanlagen	16
2.3.1	Filtrationsverfahren	16
2.3.2	Oxidationsverfahren	17
2.4	Technische Einrichtungen zur Abgassimulation	20
<b>3</b>	<b>Abgassimulator des Fraunhofer IBP</b>	<b>22</b>
3.1	Technischer Aufbau des Abgaslaborsystems	24
3.1.1	Erzeugung des Grund-Abgases	24
3.1.2	Zugaben von staub- und gasförmigen Komponenten (Schadstoffe)	27
3.1.3	Messeinrichtung	32
3.1.4	Abgasfördersystem	33
3.1.5	Steuerungs- und Regeleinheit und Datenerfassungssystem	33
3.2	Charakteristiken und Anwendungen des Abgaslaborsystems	34
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>35</b>
4.1	Untersuchte Strukturen	35
4.2	Bewertungskriterien	37
4.2.1	Aerodynamisches Verhalten (Druckverlust)	38
4.2.2	Beladungsverhalten und Selbstregenerierung (thermische Regenerierung)	38
4.2.3	Oxidationsleistung oder Reduktionsgrad	39
4.2.4	Abscheidegrad	39
4.2.5	Thermische, chemische und mechanische Beständigkeit	40
4.3	Untersuchungsergebnisse	40
4.3.1	Aerodynamisches Verhalten (Druckverlust)	41
4.3.2	Beladungsverhalten und Selbstreinigung (thermische Regenerierung)	43
4.3.3	Oxidationsleistung (Reduktionsgrad) von Kohlenmonoxid und Propan	45
4.3.4	Filtrationsleistung für staubförmige Schadstoffe (Ruß)	48
4.4	Bewertung der untersuchten Strukturen	53
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>56</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vorausgesetzte Parameter für die Verbrennung. ....	15
Abbildung 2:	Technischer Aufbau des gesamten Abgassimulators des Fraunhofer IBP. ....	22
Abbildung 3:	Aufbau des Porenbrenners im Abgassimulator, Brennerkopf (oben links in Betrieb, oben rechts nicht in Betrieb). ....	25
Abbildung 4:	Massendurchflussregler für die Zugabe von Kohlenmonoxid, Methan und Propan (links) und die Einspeisungsstelle in den Abgassimulator (rechts). ....	28
Abbildung 5:	Spezielle Lanze für die Zugabe von staub- und gasförmigen Emissionen in den Abgassimulator. ....	29
Abbildung 6:	Abgasmessstrecke (Dimensionen in mm). ....	29
Abbildung 7:	Dosier- und Dispergiersystem RBG 1000I (links), Ruß-Generator DSP 3000 H der Firma PALAS. ....	30
Abbildung 8:	Regelungs- und Steuerungseinheit des Abgassimulators. ....	34
Abbildung 9:	Beispiele für nicht-deterministische (Drahtgestrick, oben links und Schaumstruktur aus Nichtoxidkeramik, oben rechts) und deterministische keramische (Füllkörper, unten links) Strukturen. ....	36
Abbildung 10:	Aufbau der untersuchten Strukturen. ....	37
Abbildung 11:	Beladung der Schaumplatten aus Nichtoxidkeramik (links) sowie Füllkörper-Module (keramische Pall-Ringe, 50 mm) mit Ruß während der Anfahrphase eines Kaminofens. ....	51
Abbildung 12:	Schaumplatten aus Nichtoxidkeramik (links) sowie Füllkörper-Module (keramische Pall-Ringe, 50 mm) nach der thermischen Regenerierung bzw. während der Regelbetriebsphase eines Kaminofens. ....	52

## Diagrammverzeichnis

Diagramm 1:	Feuerraum- und Abgastemperaturen, Verweilzeit und Sauerstoff bei einem Scheitholzofen. ....	16
Diagramm 2:	Gemessene CO-, NO <sub>x</sub> -, C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> - und CO <sub>2</sub> -Konzentrationen beim 8-stündigen Dauerbetrieb des Porenbrenners. ....	26
Diagramm 3:	Druckverlust der untersuchten Strukturen im Neuzustand. ....	42
Diagramm 4:	Beladungsverhalten der untersuchten Strukturen. ....	44
Diagramm 5:	Reduktionsgrade von Kohlenmonoxid (CO) in den untersuchten Strukturen. ....	47
Diagramm 6:	Reduktionsgrad des Propans (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) in den untersuchten Strukturen. ....	47
Diagramm 7:	Oxidationsleistung, Vergleich Kohlenmonoxid (CO) und Propan (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ). ....	48
Diagramm 8:	Fehler bei verschiedenen Geschwindigkeitsverhältnissen bei der gravimetrischen Staubmessung [Zenker 1971]. ....	49
Diagramm 9:	Abscheideleistung für Staub, Ruß > 1µm, 350 °C. ....	50
Diagramm 10:	Abscheideleistung für Staub, Ruß > 1µm, 700 °C. ....	53

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrad bei Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß der 1. BImSchV.....	13
Tabelle 2:	Emissionen beim Betrieb der Porenbrennertechnik in unterschiedlichen Leistungsbereichen. ....	27
Tabelle 3:	Untersuchte Strukturen mit den wichtigen Abmessungen der Module. ....	36
Tabelle 4:	Empfohlene Flächenbelastung der untersuchten Strukturen. ....	42
Tabelle 5:	Nötige Strömungsflächen für eine Feuerungsanlage mit einer thermischen Nennwärmeleistung von ca. 8 kW. ....	43
Tabelle 6:	Bewertung der Struktur bezüglich des Einsatzes in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen. ....	54

## 1 Einleitung

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

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 realisieren lässt und zunehmend an Bedeutung gewinnen sollte, da hierdurch eine angemessenere Bewertung/Kontrolle im Vergleich zur heutigen Kontrolle durch den Schornsteinfeger gemäß der 1. BImSchV erreicht werden kann.

Primärmaßnahmen können konzeptionelle, konstruktive und regelungstechnische Maßnahmen sowie integrierte Technologien sein, welche die Verbesserung des Verbrennungsverhaltens gewährleisten und prinzipiell vor dem Wärmeaustausch in den Kleinfeuerungsanlagen eingesetzt werden. 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 den Einsatz einer Abgasbehandlungsanlage sollte Platz entsprechend geplant und zur Verfügung gestellt werden.
- Beim Einsatz von Abgasbehandlungssystemen im Haushaltbereich 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 beim Elektroabscheider oder von Druckbehältern wie bei Oberflächenfiltern (Abreinigungsfilter) im Haushalt ist kritisch zu sehen.
- Da solche Abgasbehandlungssysteme nicht selbstlaufende Systeme sind, ist mit entsprechendem Aufwand und Fachkräften für den Betrieb solcher meistens technisch komplizierten Systeme vor Ort zu rechnen. Die technische Pflege, Reinigung und Wartung kann nur durch ausgebildete Fachkräfte durchgeführt werden, was die Erhöhung der Betriebskosten und somit die sinkende Akzeptanz seitens der Nutzer zur Folge hat.
- Die bisher entwickelten Abgasbehandlungssysteme, vor allem Staubabscheider, zeigen bisher keine Stabilität im Dauerbetrieb. Sollten sie nicht entsprechend im Praxisbetrieb überwacht werden, 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 Reduzierung der 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 IBP zur nachhaltigen Emissionsminderung in Kleinfeuerungsanlagen beruht darauf, dass die Minderung der Schadstoffemissionen im Feuerraumbereich in der thermisch aktiven Zone und vor der Wärmeabgabe erfolgen und dort beendet werden soll. Die bei der Verbrennung entstehende Wärme soll durch entsprechende Technologien (integrierte Oxidationsreaktoren bzw. Filter-Reaktor-System) 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 Hochtemperaturspeichermodul 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 ganzen 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.

Zur Entwicklung solcher integrierter Schadstoffminderungsmaßnahmen ist eine spezielle technische Einrichtung notwendig, welche die Nachbildung des Abgases aus der Verbrennung von Biomasse sowie die Einstellung definierter Betriebsbedingung bzw. physikalische, chemische und thermodynamische Parameter ermöglicht. Diese Einrichtung (Abgassimulator) wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelt und für die Ermittlung der Korrelation zwischen der Reaktorarchitektur und der Filtrations- und Oxidationsleistung bei der thermischen Behandlung von staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen in biomassebetriebenen Kleinf Feuerungsanlagen eingesetzt. Ein besonderer Fokus soll auch auf Strukturen liegen, die sich tolerant in Bezug auf eine mögliche Aschebelastung (nicht brennbare Bestandteile) verhalten und gleichzeitig ihre Funktion zur Schadstoffbehandlung erfüllen. Das Gesamtvorhaben ist in zwei Phasen aufgeteilt. Zunächst wurden Untersuchungen an einem Abgaslaborsystem zur Simulation unterschiedlicher Betriebszustände unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse in der zweiten Projektphase unter realen Bedingungen an einer speziellen Forschungs-Feuerungsfeuerstätte verifiziert und die Grundlage für die Auslegung dieser Art integrierter Technologien erstellt.

Im Rahmen dieses Projekts wurden zwei Typen von Strukturen, deterministische und nicht-deterministische, untersucht. Für jeden Typ wurden zwei Strukturen mit unterschiedlichen Architekturen und Materialien untersucht. Die Untersuchungen wurden bezüglich der Einsatz- und Betriebsbedingungen der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen durchgeführt:

- deterministische Strukturen
  - metallische Füllkörper, Pall-Ring 35 mm
  - keramische Füllkörper, Pall-Ring: 50 mm

- nicht-deterministische Strukturen
  - Schaumstruktur aus Nichtoxidkeramik, Porendichte von 10 ppi, Dicke 20 mm.
  - Drahtgestrick, Drahtstärke 0,2 mm , Dicke 100 mm.

Die Beurteilung der Architektur der zu untersuchenden Strukturen soll gemäß der Bewertungsmethode des Fraunhofer IBP nach folgenden Kriterien erfolgen:

- **Reduktionsgrad** beschreibt die Reduzierung der gas- und staubförmigen Schadstoffemissionen durch die thermische Behandlung bzw. Oxidation.
- **Abscheidegrad** beschreibt die Reduzierung der staubförmigen Schadstoffemissionen ( $< 0,7 \text{ m}\mu$ ) durch die mechanische Abscheidung (wie z. B. Filtration, Sedimentation). Die Messung des Abscheidegrades erfolgt durch die gravimetrische Staubbmessung gemäß VDI 2066-1.
- **Beladungsverhalten und thermische Selbstregenerierung** (Selbstreinigung) der Struktur während des Verbrennungsprozesses. Hier wird die Abilität bzw. die Fähigkeit der Strukturen untersucht, sich eigenständig und insbesondere ohne äußeren Eingriff von den abgeschiedenen Stäuben beim Erreichen einer günstigen Oxidationstemperatur befreien zu können.
- **Aerodynamisches Verhalten** beschreibt den Druckverlust in der Struktur in allen Betriebsphasen bzw. im Neuzustand vor der Beladung und während des Betriebs. Besonders wichtig ist die Simulation der kritischen Betriebsphase der Feuerungsanlagen, in der in der Regel große Mengen problematische Stäube entstehen.
- **Mechanische Beständigkeit und Abriebfestigkeit** der Struktur im Neuzustand und nach dem Einsatz bzw. nach thermischer Belastung. Dieser Parameter beschreibt die Widerstandsfähigkeit der Struktur gegen die mechanische Belastung.

Die Untersuchung der oben aufgelisteten Strukturen wurde unter Berücksichtigung der Einsatz- und Betriebsbedingungen (Temperatur, Druck, Schadstoffbelastung usw.) der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen durchgeführt. Sie sind die meist verbreitetsten Kleinf Feuerungsanlagen. Daher soll jede Anstrengung zur Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens zu einer deutlichen Emissionsminderung in Wohngebieten führen.

Es ist zu erwähnen, dass es bisher keine bekannte, mit dem im Rahmen dieses Projektes geplanten Abgasanalysator vergleichbare technische Einrichtung in Deutschland gibt, die die oben erwähnten Untersuchungen unter reproduzierbaren Bedingungen ermöglicht. Der geplante Abgassimulator soll die Nachbildung von Abgasen aus unterschiedlichen Industrieprozessen ermöglichen und Messungen unter bekannten und reproduzierbaren Bedingungen realisieren.

## 2 Stand der Wissenschaft und der Technik

In dieser Arbeit wird der Stand der Technik bezüglich folgender Punkte dargestellt:

- Überblick über die Kleinfeuerungsanlagen der 1. BImSchV und ihre Besonderheiten,
- Problematik in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen,
- Integrierte Technologien zur Schadstoffminderung in biomassebetriebenen Kleinfeuerungsanlagen der 1. BImSchV
- Verfügbare technische Einrichtungen zur Abgassimulation

### 2.1 Kleinfeuerungsanlagen der 1. BImSchV

Kleinfeuerungsanlagen werden durch die 1. BImSchV (Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen) geregelt. Sie haben eine thermische Nennwärmeleistung bis 1.000 kW<sub>th</sub> und dürfen nur mit bestimmten Brennstoffen betrieben werden. Diese Brennstoffe sind im Paragraph 3 der 1. BImSchV genannt. Bezüglich des Einsatzes im Haushalt ist zwischen dezentral und zentral einzusetzenden Kleinfeuerungsanlagen zu unterscheiden:

- Zentral einzusetzende Feuerungsanlagen (Heizkessel: Pellet-, Hackschnitzel- und Holzvergaserkessel): Diese werden vor dem Inverkehrbringen gemäß der DIN EN 303-5 sowie der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG geprüft sowie gemäß der 1. BImSchV wiederkehrend einmal in jedem zweiten Kalenderjahr überwacht. Die wiederkehrende Überwachung soll hier nur für Heizkessel mit einer thermischen Nennwärmeleistung größer als 4 Kilowatt durch den zuständigen Schornsteinfeger gemäß dem Abschnitt 4 der 1. BImSchV durchgeführt werden.
- Dezentral im Wohnraum einzusetzende Feuerungsanlagen bzw. Einzelraumfeuerungsanlagen: Diese Feuerungsanlagen machen über 90 % der gesamten Biomassefeuerungen der 1. BImSchV aus und werden für die Bereitstellung der Wärme sowie Warmwasser eingesetzt. Vor dem Inverkehrbringen müssen die Einzelraumfeuerungsanlagen nach bestimmten Normen (Raumheizer: DIN EN 13240, Kamineinsätze und Kachelöfen: DIN EN 13229 und Speicherfeuerstätten: DIN EN 15250, DIN EN 14785 usw.) von einer unabhängigen Prüfstelle wie z. B. die Prüfstelle Feuerstätten und Abgasanlagen des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik IBP (D-PL-11140-11-03) geprüft werden. Einzelraumfeuerungsanlagen unterliegen keiner wiederkehrenden Emissionsüberwachung durch den Schornsteinfeger unabhängig von ihrer thermischen Leistung und dem eingesetzten Brennstoff. Sie müssen lediglich bei der Typprüfung sowohl bestimmte Emissionsgrenzwerte als auch Mindestwirkungsgrade einhalten (Tabelle 1).

Die Besonderheit der Biomassefeuerungsanlagen liegt darin, dass der Betreiber durch sein Verhalten sowohl den Brennstoff als auch die Verbrennungstechnik (insbesondere durch die Bedienung und die Wartung) stark beeinflussen kann. Aufgrund dieser Doppelbeeinflussung soll die Regelung des Betreiberhaltens maßgeblich zu einer effizienten und umweltverträglichen Energiebereitstellung durch die thermische Umsetzung von Biomasse beitragen.

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

Feuerstätte	Prüfnorm	1. Stufe:		2. Stufe:		1. und 2. Stufe
		Errichtung seit 22.03.2010		Errichtung seit 31.12.2014		Errichtung seit 22.03.2010
		CO	Staub	CO	Staub	Mindestwirkungsgrad
		[g/m <sup>3</sup> ] <sup>(*)</sup>				
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
Speichereinzelfeuerstätten	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	0,075	0,25	0,03	85
Pelletöfen mit Wassertasche	DIN EN 14785	0,40	0,075	0,25	0,02	90

(\*) Die Emissionswerte beziehen sich auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas von 13 Vol.-%. Das Abgas ist trocken und in den Normzustand umgerechnet.

Handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen haben die Besonderheit, dass sie bisher aus Vermarktungsgründen ohne Stromversorgung sowie ohne jegliche Art automatischer Steuerung oder Regelung betrieben werden können. Daher ist der Einfluss des Betreibers auf das Verbrennungs- und somit auf das Emissionsverhalten in diesen Feuerungsanlagen sehr ausschlaggebend. Zusätzlich dazu können die handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen nur bei bestimmten Betriebsbedingungen eine emissionsarme Verbrennung gewährleisten, welche meistens durch die Hersteller im Rahmen der

Typprüfung festgelegt und in der Bedienungs- und Aufstallanleitung der Feuerungsanlagen angegeben werden sollten. Im Folgenden sind die wichtigsten Einflussfaktoren des Nutzers auf den Betrieb solcher Feuerungsanlagen dargestellt:

- Beschickungsregime der Feuerungsanlage,
  - Brennstoffauswahl (Art und die verbrennungstechnischen 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.

Meistens werden die Betriebsangaben des Herstellers in der Praxis durch die Nutzer nicht eingehalten, wodurch sich ein sachgemäßer (emissionsarmer und effizienter) Betrieb nur bedingt erreichen lässt. Die Fehlbedienung der Feuerungsanlage hat die unvollständige Verbrennung und somit erhöhte Schadstoffemissionen in Wohngebieten zur Folge.

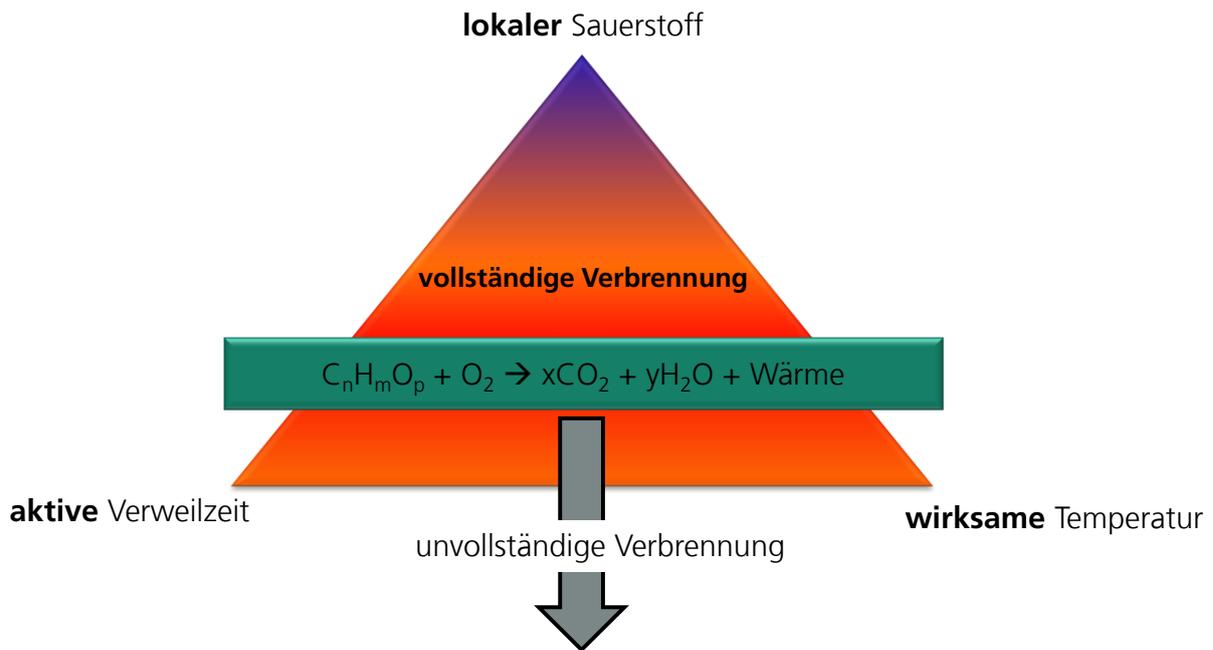
Die Forschungsstrategie des Fraunhofer IBP war die Entwicklung von Schadstoffminderungstechnologien unter Berücksichtigung der oben genannten Besonderheiten der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen, welche den Einfluss des Nutzers auf die Verbrennungsqualität mindern und sich in die Feuerungsanlagen ohne Widerspruch mit den Angaben jeweiliger Prüfnormen integrieren lassen.

Um die Problematik bei diesen Feuerungsanlagen näher verstehen und somit die Untersuchungsbedingungen der ausgesuchten Strukturen festlegen zu können, war es nötig, das Verbrennungs- und Emissionsverhalten in handelsüblichen Feuerungsanlagen durch reale Messungen zu studieren (Abschnitt 2.2).

## **2.2 Problematik in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen**

Für eine vollständige Verbrennung wird eine wirksame Temperatur und ausreichend lokaler Sauerstoff benötigt. Die brennbaren gasförmigen Bestandteile sollen 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 oben genannten Parameter (wirksame Temperatur, lokaler Sauerstoff und ausreichend aktive Verweilzeit) sollten zu jedem Zeitpunkt des Verbrennungsprozesses stimmen, sonst entsteht eine unvollständige Verbrennung mit diversen staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen (Abbildung 1).

Durch langjährige Erfahrungen mit dem Betrieb unterschiedlicher Typen von Einzelraumfeuerungsanlagen im Rahmen der Typprüfungen in der Prüfstelle Feuerstätten und Abgasanlagen des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik IBP (D-PL-11140-11-03) wurde in vielen Einzelraumfeuerungsanlagen beobachtet, dass trotz ausreichend hoher Temperatur im Feuerraumbereich und genügend hohen Sauerstoffkonzentrationen im Abgas (Luftüberschusszahl bzw. Lambda zwischen 1,8 und 4,0) eine unvollständige Verbrennung stattfindet.



Staub- und gasförmige Schadstoffemissionen (CO, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, PAKs und org. Feinstaub usw.)

Abbildung 1: Vorausgesetzte Parameter für die Verbrennung.

Diagramm 1 zeigt die Feuerraum- und Abgastemperaturen, den Sauerstoffgehalt im Abgas und die Verweilzeit bei der Verbrennung in einem Scheitholzofen. Es ist ersichtlich, dass es Betriebsphasen gibt, in denen die thermische Oxidation bzw. die Verbrennung aufgrund niedriger Temperaturen (< 500 °C) nicht vollständig ablaufen kann (siehe eingekreiste Stellen in Diagramm 1).

Die Verbrennung in diesen ungünstigen Betriebsphasen kann durch den Einsatz von thermischen und katalytischen Oxidationsverfahren verbessert werden. Im Folgenden werden die bisher bekannten Technologien zur Abgasreinigung- bzw. -behandlung in Kleinfeuerungsanlagen dargestellt, die auf Basis der Filtrations- und Oxidationsverfahren funktionieren und sich in den Kleinfeuerungsanlagen einbauen lassen

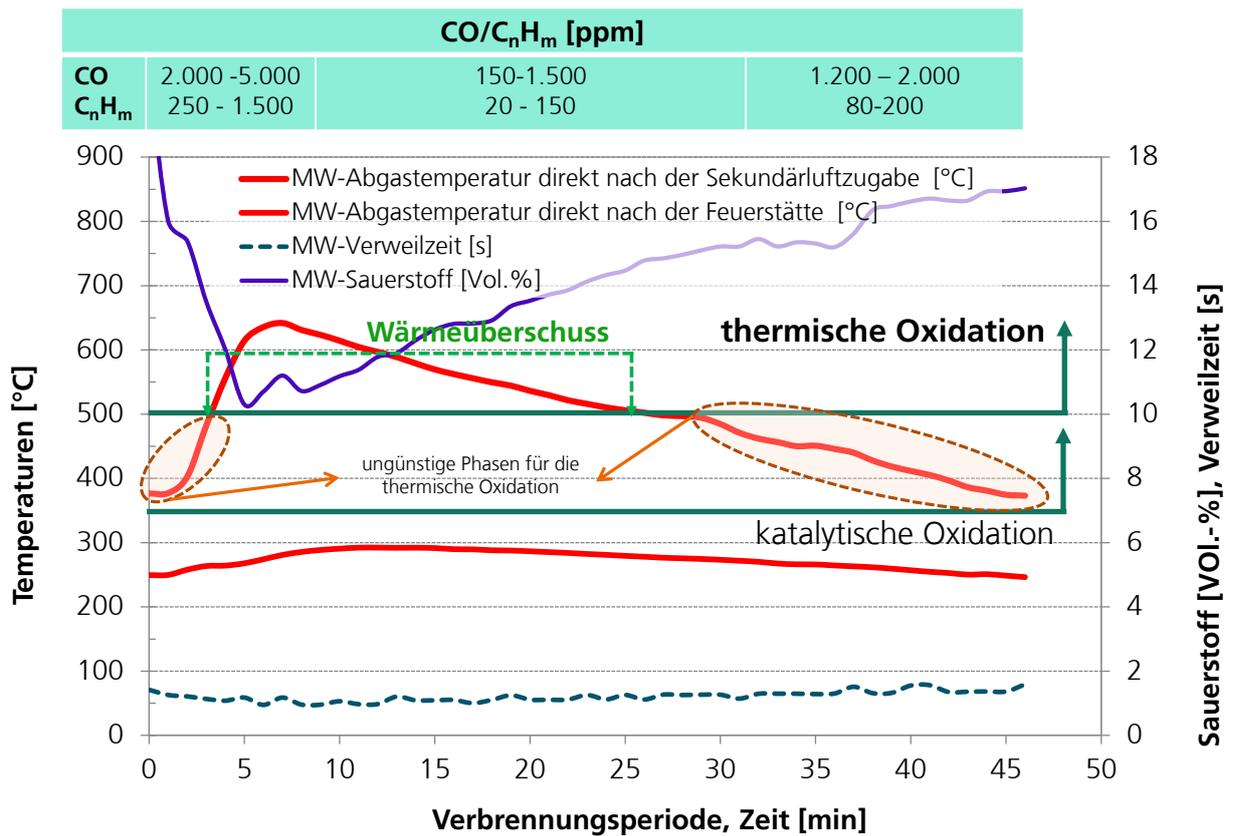


Diagramm 1: Feuertemperatur- und Abgastemperaturverläufe, Verweilzeit und Sauerstoff bei einem Scheitholzofen.

## 2.3 Integrierbare Technologien zur Abgasbehandlung in Kleinf Feuerungsanlagen

Bei den integrierbaren Technologien zur Abgasbehandlung in Kleinf Feuerungsanlagen kommen Filtrations- und Oxidationsverfahren zum Einsatz. Diese Verfahren werden in folgenden Abschnitten beschrieben:

### 2.3.1 Filtrationsverfahren

Die bisher verbreiteten Filtrationsverfahren basieren auf dem Abscheideprinzip vom Speicherfilter. Dabei werden die Stäube mechanisch durch Sperren oder Sedimentation abgetrennt. Als Struktur werden Materialschüttungen (Granulate) oder Schaumkeramik (in der Regel Nichtoxidkeramik) verwendet. Auf und in der Filterstruktur sollen die staubförmigen Schadstoffe abgetrennt und beim Erreichen günstiger Temperaturen frei verbrannt werden. Die anorganischen Bestandteile bleiben in der Struktur gelagert. Das führt zur Notwendigkeit einer ständigen manuellen Reinigung der Struktur aufgrund der Zunahme des Strömungswiderstands. Das Filtrationsverhalten hängt von vielen Faktoren wie z. B. der Geometrie, der Porengröße und der Filterflächenbelastung ab. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Schaumstruktur aus Nichtoxidkeramik mit unterschiedlichen Porengrößen (3 x 10 ppi, 10 ppi und 20 ppi) untersucht.

Die Problematik bei solchen Strukturen (Schüttung und Schaumkeramik) liegt darin, dass eine schnelle Verstopfung beim Einsatz ungünstiger Brennstoffe oder bei niedrigem Unterdruck in der Abgasanlage erfolgt. Dies tritt bei Granulat-Schüttung 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 abgebaut 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 zeichnet sich durch geringe Duktilität und hohe Sprödigkeit aus. Im Praxisbetrieb der Einzelraumfeuerungsanlagen können die Schaumkeramikplatten bei der Reinigung durch die Nutzer beschädigt bzw. gebrochen werden. Aufgrund fehlender rechtlicher Überwachungs- bzw. Austauschregelung werden die Filterplatten nicht mehr ersetzt. Meistens und gemäß Praxiserfahrungen werden die Betriebsangaben (wie z. B. Auflagerregie, Wartungsintervalle, Lufteinstellung, Filteraustausch usw.) der Hersteller vom Anlagenbetreiber nicht berücksichtigt.

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

## **2.3.2 Oxidationsverfahren**

Bei den Oxidationsverfahren ist zwischen katalytischen und thermischen Verfahren zu unterscheiden. In der letzten Zeit wurden viele katalytische Verfahren zum Einsatz in biomassebetriebenen Kleinfeuerungsanlagen entwickelt und eingesetzt. Thermische Oxidationsverfahren wurden erst in der Gruppe Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP erforscht und haben ein hohes Potential sowohl für eine sichere und nachhaltige Schadstoffreduzierung als auch für eine bedeutsame Effizienzerhöhung gezeigt (siehe Abschnitt 2.3.2.2).

### **2.3.2.1 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. Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, VOCs, PAKs) kommen mit der katalytisch-aktiven Oberfläche des Katalysators in Kontakt. In Anwesenheit des Sauerstoffs können die Oxidationsreaktionen bei einer Temperatur größer als 300 °C stattfinden. Diese Schadstoffe werden durch Oxidation in Stoffe wie Wasser und Kohlendioxid überführt und dadurch gemildert. Der Katalysator

nimmt an den Reaktionen nicht teil bzw. wird nicht gebraucht. Er gewährleistet lediglich, dass die Reaktionen bei niedrigerem Temperaturniveau (schon bei 300 °C statt bei 500 °C für die thermische Oxidation) stattfinden können.

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 und 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 mechanische Belastungen nicht auszuschließen. Je rauer die Einsatzbedingungen des Katalysators sind, umso schneller und stärker treten solche Verluste auf [Beebe et al. 1943, Schultes 1996, nach Janbozorgi et al. 2010].

Katalytische Oxidationsverfahren haben den Nachteil beim Einsatz in biomassebetriebenen Kleinfeuerungsanlagen, dass eine katalytische Vergiftung bei der Verbrennung ungünstiger Brennstoffe aufgrund hoher Belastung unerwünschter Schadstoffe (wie z. B. Halogene, Schwefel, Polymere, Teer, Ruß und sonstige Aerosole) auftritt und 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 nach mehreren Betriebsstunden beschädigt und somit die katalytische Wirkung ausgesetzt. Wesentlich ist, dass ein Teil der katalytischen Beschichtung bzw. Schwermetalle wie Platin, Rhodium und Palladium mit der Zeit abgetragen, über das Abgas in die Umgebung getragen werden [nach Beebe et al. 1943, Janbozorgi et al. 2010] und gesundheitliche sowie Umweltprobleme verursachen kann.

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 und 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 Auftreten von Funktionsschäden in der Praxis kontrolliert wird. Darüber hinaus ist die betriebliche Manipulierung solcher Abgasreinigungssysteme aufgrund des integrierten Abgasbypasses oder der leichten Zugänglichkeit und der Abbaumöglichkeit dieser Systeme gemäß der Prüfnormen (Raumheizer: DIN EN 13240, Kamineinsätze und Kachelöfen: DIN EN 13229) nicht zu vermeiden.

Aus umweltschutztechnischer und rechtlicher Sicht sollten die katalytischen Verfahren in Einzelraumfeuerungsanlagen ohne eine entsprechende wiederkehrende Kontrolle wie z. B. durch den zuständigen Schornsteinfeger nicht eingesetzt werden. Ziel dieser Maßnahme ist, dass diese Katalysatoren nicht nur auf dem Prüfstand sondern auch dauerhaft in der Praxis funktionieren 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  $> 800\text{ °C}$  und hohe Konzentration an Katalysatorgiftstoffe) in Biomassefeuerungsanlagen nach mehreren Betriebsstunden auftreten können.

### 2.3.2.2 Thermische Oxidationsverfahren

Die bislang einzig bekannte Technik, die auf Basis reiner thermischer Oxidation funktioniert, ist die Füllkörper- oder Einbautechnik. Diese Technik wurde im Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP entwickelt und im Rahmen eines von FNR finanzierten Projektes (FKZ: 13NR104, Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens in biomassebetriebenen Kleinfeuerungsanlagen durch den Einsatz spezieller Einbauten) erforscht. Sie hat ein hohes Potential sowohl zur Minderung der gas- und staubförmigen Emissionen als auch zur bedeutsamen Erhöhung der Effizienz gezeigt.

Das Wirkungsprinzip der Einbauten-Technik beruht auf der Bereitstellung günstiger Oxidationsbedingungen während der Verbrennung innerhalb eines Einbauten-Moduls (spezielles Filter-Reaktor-System). Dies speichert ausreichend Energie und gewährleistet durch seine spezielle Struktur eine Intensivierung der Durchmischung von brennbaren Abgasbestandteilen mit der Verbrennungsluft sowie die Verlängerung der aktiven Verweilzeit durch die mehrfache Umlenkung. Die gespeicherte Energie soll die Oxidation in ungünstigen Betriebsphasen wie z. B. beim Auflegen von Holz ermöglichen und zu einem stabilen Verbrennungsvorgang unabhängig von der Dynamik des Verbrennungsprozesses führen. Die Einbauten-Technik kennzeichnet sich durch folgende Merkmale:

- Sie ist langlebig und unterliegt keiner Alterung, da die Oxidation rein thermisch bzw. nicht katalytisch unterstützt stattfindet.
- Sie gewährleistet einen stabilen Betrieb, niedrige Emissionen und eine bedeutsame Erhöhung des Wirkungsgrads.
- Durch den Einsatz der Einbauten-Technik wird eine Brennstoffersparnis von mindestens 10 % erzielt.
- Sie zeigt einen niedrigen Strömungswiderstand durch große Öffnungen (Durchmesser des Abgaswegs bis 7 cm möglich). Der Druckverlust liegt während des Betriebs unter 2 Pascal.
- Es besteht keine Verstopfungsgefahr beim Einsatz ungünstiger Brennstoffe aufgrund großer Abgaswege.
- Die Einbauten-Technik ist sehr robust gegenüber der Art der Beschickung und der Änderung von verbrennungstechnischen Eigenschaften vom Brennstoff.

- Sie ist im Praxisbetrieb nicht manipulierbar.
- Die Einbauten-Technik ist preiswert und nachrüstbar. Die Materialkosten liegen deutlich unter 15 €/Modul. Außerdem werden zur Anfertigung der Einbauten-Module keine speziellen Anfertigungstechnologien oder Sonderkompetenzen benötigt.
- Zum Betrieb der Einbauten-Technik wird keine zusätzliche Energie benötigt.

Im Rahmen des oben erwähnten Projekts (FKZ: 13NR104) wurde die Einbau-Technik in mehreren Einzelraumfeuerungsanlagen eingesetzt und bei unterschiedlichen Betriebsweisen und –zuständen ausführlich untersucht. Bei den Untersuchungen wurden metallische und keramische Pallringe verwendet und als Einbau-Modul zusammengebaut. Die Messungen haben gezeigt, dass beim Einsatz von der Einbauten-Technik sowohl eine große Emissionsminderung und hohe Betriebsstabilität als auch eine bedeutsame Effizienzerhöhung erreicht werden kann. Dabei wurden Konzentrationen an Gesamtstaub von 10 bis 30 mg/Vm<sup>3</sup> im Vergleichszustand gemessen. Kohlenmonoxid (CO) lag im Mittelwert zwischen 200 mg/Vm<sup>3</sup> und 550 mg/Vm<sup>3</sup>. Die Gesamtkohlenwasser-stoffe (gemessen als Propan) schwankten im Mittelwert zwischen 10 mg/Vm<sup>3</sup> und 40 mg/Vm<sup>3</sup>. Außerdem wurde eine Verbesserung des Wirkungsgrads von ca. 12 % erreicht bzw. der Wirkungsgrad bis 87 % erhöht.

## 2.4 Technische Einrichtungen zur Abgassimulation

Das hessische Landesamt für Umwelt und Geologie in Kassel verfügt über eine Anlage (ESA: Emissions-Simulations-Anlage) für die Simulationen von Emissionen. Diese Anlage wurde durch das hessische Landesamt für Umwelt für die Entwicklung und Validierung von Probenahmeverfahren und Probenahmegeräten in Zusammenarbeit mit dem Staatsbauamt und verschiedenen Unternehmen in den neunziger Jahren entwickelt und im Jahr 2011 durch die Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) nach DIN EN ISO ICE 17043 sowie DIN EN ISO ICE 17025 akkreditiert [Eickhoff 1994, 1995, HLFU 1994, Jungermann 1996, Platt 2000].

Die ESA ist ein fest aufgebauter Windkanal, der eine gesamte Länge von 70 m und einen Durchmesser von 40 cm besitzt. Es wird als offenes System mit Umgebungsluft betrieben, welche durch ein drehzahlgesteuertes Gebläse abgesaugt wird. Dieses Gebläse kann einen Luftvolumenstrom bis 900 m<sup>3</sup>/h stufenlos bereitstellen und in den Kanal zuführen [Eickhoff 1994, 1995, HLFU 1994, Jungermann 1996, Platt 2000].

Die Dosierung der luftfremden Stoffe (staub- und gasförmige Komponenten) erfolgt durch ein Dosierlabor. Zur Simulation der staubförmigen Emissionen werden industrielle hochfein gemahlene Stäube verwendet, welche über ein Dosiersystem in den Luftstrom eingetragen werden. Die Kontrolle der Zugabe erfolgt gravimetrisch. Die eingestellten Staubkonzentrationen werden durch die in den Luftkanal dosierte Staubmenge, den Zeitraum der Dosierung und

den Luftvolumenstrom gerechnet. Hier sind Staubkonzentrationen von  $1 \text{ mg/m}^3$  bis  $50 \text{ mg/m}^3$  zu erzeugen, wobei üblicherweise mit minimalen Konzentrationen von  $12 \text{ mg/m}^3$  gearbeitet wird. Die Kontrolle der im Luftkanal herrschenden Staubkonzentration erfolgt durch LMS 181-Photometer. Bei der Emissions-Simulations-Anlage des hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie können auch organische und anorganische gasförmige Komponenten zugegeben werden. Hier können folgende Konzentrationsbereiche realisiert werden:

- Schwefeldioxid von 20 bis  $150 \text{ mg/m}^3$
- Stickstoffoxide (angegeben als  $\text{NO}_2$ ) von 60 bis  $450 \text{ mg/m}^3$
- Propan (angegeben als  $C_{\text{gesamt}}$ ) von 5 bis  $100 \text{ mg/m}^3$

Diese Abgaskonzentrationen werden auf der Basis von Reingasen durch Verdünnung erzeugt. Die Abgaszugaben werden über Volumenstrommessungen mit Gasuhren und thermischen Massendurchflussmessern kontrolliert bzw. geprüft. Die eingestellten Abgaskonzentrationen können sowohl mittels konventioneller Einzelgasanalysatoren als auch mit einem FTIR-Spektrometer der Firma OPSIS kontrolliert werden [Eickhoff 1994, 1995, HLFU 1994, Jungermann 1996, Platt 2000].

Die Zugabe der organischen Gasdämpfe erfolgt durch ein spezielles Dosiersystem »HOVACAL«. Hier wird ein Gemisch mit bekanntem Gehalt aus Ethylbenzol, Toluol und Xylole vorbereitet und durch ein Leitungssystem mittels einer lösemittelbeständigen Zahnringpumpe mit genau eingestelltem Fluss über einen Verdampfer in den ESA-Luftkanal geleitet. Die Massenabnahme des auf der Waage befindlichen Dosiergemisches pro Dosierzeit und der zugehörige Volumenstrom unter Berücksichtigung der Randbedingungen (Druck, Temperatur, Feuchte usw.) ermöglichen die Berechnung der dosierten Massenkonzentrationen dieser Komponenten. Die Messung der Konzentration dieser Dämpfe erfolgt durch einen Flammen-Ionisations-Detektor (FID). Hier sind Konzentrationen von  $4$  bis  $100 \text{ mg/m}^3$  einzustellen. Die ESA verfügt über eine Einlauf- und Messstrecke. Bei dieser Messstrecke handelt es sich um ein durchgehendes, 14 Meter langes, innen geschliffenes Edelstahlrohr, das auf der Dosierstrecke aufsitzt. Auf dieser Messstrecke ist ein auswechselbares Rohrstück mit fünf Messöffnungen (Normflansche 150) angebracht. Diese Normflansche sind mit zwei bis drei-Zoll-Öffnungen ausgestattet und erlauben durch die Wechsel der Flanschdeckel die Adaption größerer Probenahme-einrichtungen. Außerdem verfügt der Luftkanal über weitere Öffnungen, die für die Erfassung von Luftgeschwindigkeit, Lufttemperaturen und sonstiger Messgrößen sowie für zusätzliche Probenahmen verwendet werden [Eickhoff 1994, 1995, HLFU 1994, Jungermann 1996, Platt 2000].

### 3 Abgassimulator des Fraunhofer IBP

Die große technische Herausforderung bei dieser Forschungsarbeit war die Entwicklung einer geeigneten Einrichtung zur Untersuchung der Korrelation zwischen der Architektur von drei dimensional Strukturen und der Filtrations- und Oxidationsleistung von staub- und gasförmigen Emissionen bezüglich des Einsatzes in biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen (Abbildung 2).

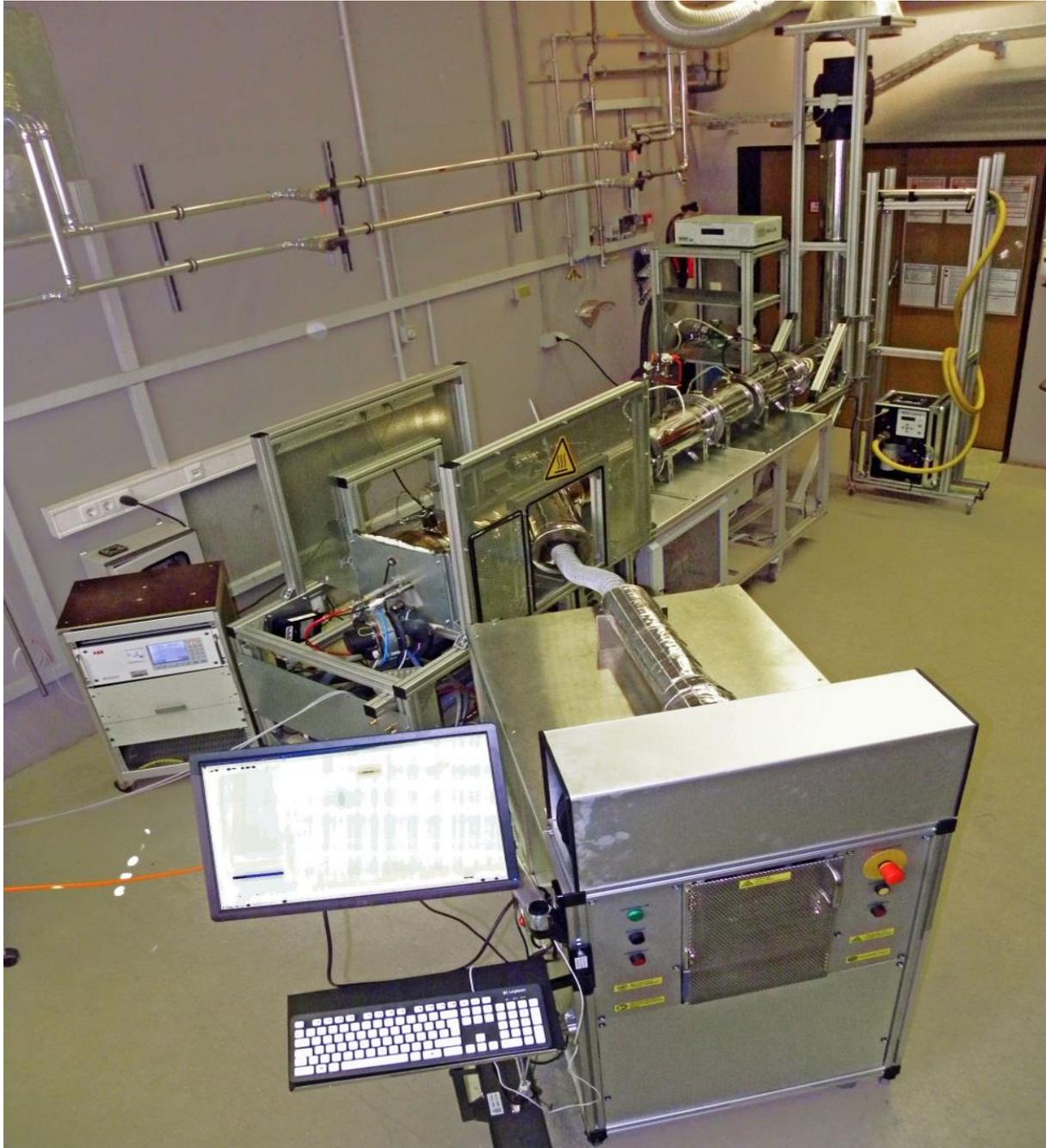


Abbildung 2: Technischer Aufbau des gesamten Abgassimulators des Fraunhofer IBP.

Der Abgassimulator, dargestellt in Abbildung 2, des Fraunhofer IBP wurde so konzipiert und konstruiert, dass sowohl Abgas als auch Abluft aus unterschiedlichen industriellen Prozessen im realen sowie heißen Zustand nachgebildet und die dazugehörigen Prozesse entsprechend simuliert werden können. Hierbei wurde großer Wert darauf gelegt, dass der Abgassimulator vielfältig und für den Dauerbetrieb eingesetzt werden kann. Im Folgenden sind die Charakteristika und technischen Besonderheiten des entwickelten Abgassimulators dargestellt:

- Der Abgassimulator kennzeichnet sich durch die hohe technische Modifizierbarkeit aus. Je nach Anwendungsfall ist er dank der innovativen Bauweise sowie des verwendeten Abgasrohrsystems so technisch umzukonstruieren und zu erweitern, dass ein vielfältiger Einsatz mit vertretbarem Aufwand gewährleistet werden kann. Dabei können unterschiedliche Durchmesser des Abgasrohrsystems realisiert sowie unterschiedliche Abluft- und Abgasmengen durch die verwendete modulierbare Porenbrennertechnik erzeugt und simuliert werden.
- Beim Betrieb des Abgassimulators sind die physikalischen, chemischen sowie thermodynamischen Parameter des zu untersuchenden Mediums in großen Bereichen und vielfältig einstellbar. Die Einstellung dieser Parameter erfolgt unter bekannten und reproduzierbaren Betriebs- und Rahmenbedingungen. Dadurch können komplizierte Messungen mit hoher Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit durchgeführt werden.
- Der Abgassimulator ermöglicht die Simulation von Abgas und Abluft aus unterschiedlichen industriellen Prozessen. Es lassen sich komplexe und ungünstige Betriebsfälle (Worst-Case-Szenarien) im Dauerbetrieb untersuchen, die im realen Betrieb nur unter bestimmten Umständen und mit entsprechenden Risiken sowie hohem Aufwand eingestellt werden können.
- Der Abgassimulator verfügt über hochgenaue und zuverlässige Messeinrichtungen zur Erfassung von staub- und gasförmigen Komponenten (Schadstoffe) sowie zur Messung der nötigen Abgasparametern (Temperaturen, Drücke, Feuchtegehalt usw.), welche für die Auswertung und Umrechnungen nötig sind.
- Die Einrichtung wird durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) bzw. mit einem Industrie-PC gesteuert. Diese Steuerung wird je nach Anwendung und Messungen angepasst und programmiert. Sie gewährleistet eine sehr sichere und automatisierte Betriebsweise.

Aufgrund des großen Marktbedarfs für eine solche bislang einzigartige Einrichtung wurde das Abgaslaborsystem nicht nur für die Durchführung der im Rahmen dieser Forschungsarbeit geplanten Messungen und Untersuchungen sondern ferner auch für die Durchführung von anderen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzipiert und aufgebaut. Beispiele für mögliche experimentelle Untersuchungen sind:

- Entwicklung und Bewertung von Abgasbehandlungssystemen unter reproduzierbaren Bedingungen wie z. B.:
  - Ermittlung von günstigen Betriebspunkten und –parametern
  - Abscheideleistung von staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen
  - Aerodynamisches Verhalten bzw. Druckverlust
  - Einfluss von Abgasparametern und Abgaskomponenten auf die Funktion
  - Effektivität und Beständigkeit katalytischer Beschichtungen
  - Aufnahmekapazität von Ab- und Adsorptionsmitteln
- „Stresstest“ für technische Abgaskomponenten (wie z. B. Sensoren, Abgasklappen usw.)
- Untersuchung des Alterungsverhaltens unterschiedlicher Aggregate (Ermittlung der Durchbruchkurve von Katalysatoren und Adsorbentien usw.),
- Entwicklung und Kalibrierung von Abgasmesssystemen und -strecken (Staubmessgeräte, Abgasanalysatoren usw.)

Im folgenden Abschnitt wird der technische Aufbau des Laborsystems ausführlich beschrieben.

### 3.1 Technischer Aufbau des Abgaslaborsystems

Im Wesentlichen besteht der Abgassimulator aus:

- Einer Einrichtung zur Erzeugung des Grund-Abgases
- Einer Einrichtung zur Bereitstellung und Zugaben von staub- und gasförmigen Komponenten (Schadstoffe)
- Einer Messeinrichtung zur Messung staub- und gasförmiger Komponenten sowie der nötigen Abgasparameter (Temperatur, Druck, Abgasgeschwindigkeit bzw. -volumenstrom)
- Einem Abgasfördersystem
- Einer Steuerungs- und Regeleinheit (SPS) mit dem Datenerfassungssystem

Im Folgenden werden diese Einrichtungen ausführlich beschrieben:

#### 3.1.1 Erzeugung des Grund-Abgases

Zur Erzeugung des Grund-Abgases mit beliebigen Temperaturen und Volumenströmen wird die Porenbrennertechnik eingesetzt. Diese Verbrennungstechnik gewährleistet sowohl eine schadstoffarme als auch eine sehr stabile Verbrennung im Dauerbetrieb. Als Brennstoffe können gasförmige Brennstoffe (Erdgas, Methan, Propan und Biogas) verwendet werden.

Das Grund-Abgas setzt sich aus Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Wasser (H<sub>2</sub>O), Sauerstoff (O<sub>2</sub>) und Stickstoff (N<sub>2</sub>) zusammen und macht in der Regel bei der thermischen Umsetzung fester Brennstoffe über 98 Vol.-% des gesamten

Abgasvolumenstroms aus. Die Verbrennung erfolgt hauptsächlich durch einen Porenbrenner.

Der Brennerkopf besteht aus zwei unterschiedlichen Lagen einer porösen Matrix (Struktur). Die erste Lage ist eine feinporige Aluminiumoxidschicht, die als Flammensperre dient und für die Vorwärmung des Gas/Luftgemisches sowie für die Stabilisierung der Verbrennung in der zweiten Struktur Lage sorgt. Die zweite Struktur Lage besteht aus einem Siliziumcarbid-schaum mit größerer Porendichte 10 bis 20 ppi. Die poröse Matrix soll den Abgasstrom immer wieder teilen. Das Keramikmaterial hat besondere Eigenschaften im Hinblick auf die Strahlungsauskopplung und die thermische Leitfähigkeit.



Abbildung 3: Aufbau des Porenbrenners im Abgassimulator, Brennerkopf (oben links im Betrieb, oben rechts nicht im Betrieb).

Der verwendete Porenbrennerkopf hat eine Fläche von ca. 245 cm<sup>2</sup> (135 mm x 180 mm) und eine thermische Leistung von ca. 26 kW und ist bis zu einer thermischen Leistung bis 100 kW zu erweitern. Der Porenbrenner wird am Anfang des Abgasrohrsystems so flexibel aufgebaut, dass er einfach zu bedienen und zu warten ist (Abbildung 3, unten). Zur Verbrennung wird Flüssiggas (Erdgas, Methan, Propan) eingesetzt. Die entsprechende Menge dieses Gases wird mit Hilfe des Gasverhältnisdrukreglers zugegeben und durch den Gasfeuerungsautomat (Firma GoGaS) gezündet. Zur Einstellung des richtigen Gasdrucks ist ein Druckminderer vorgeschaltet. Ihm folgt ein Schwebekörper-Durchflussmesser zur Messung von Durchfluss sowie zur Erkennung des Betriebszustandes (Zündung bzw. Verbrennung) des Brenners.

Für diesen speziellen Einsatzfall ergeben sich durch den Porenbrenner erhebliche Vorteile gegenüber anderen Wärmeerzeugern. Durch das Brennerdesign kann die Wärme gezielt, exakt regelbar und homogen in das Abgasrohr des Abgaslaborsystems eingebracht werden. Durch die gleichmäßige und homogene Erwärmung werden sogenannte »hot-spots« und kalte Bereiche vollständig vermieden. Weitere Vorteile sind die niedrigen Emissionen im gesamten Leistungsbereich (> 20 % der thermischen Leistung) sowie die Vermeidung von »Brennstoff-Schlupfen« (siehe Diagramm 2 und Tabelle 2). Dem Diagramm 2 ist zu entnehmen, dass die Verbrennung nicht nur schadstoffarm sondern sehr stabil und über längere Zeit stattfinden kann. Die Stabilität der Verbrennung lässt sich durch den konstanten Verlauf des Kohlendioxids erkennen. Diese Verläufe sind unabhängig von der eingestellten Leistung des Porenbrenners zu erreichen.

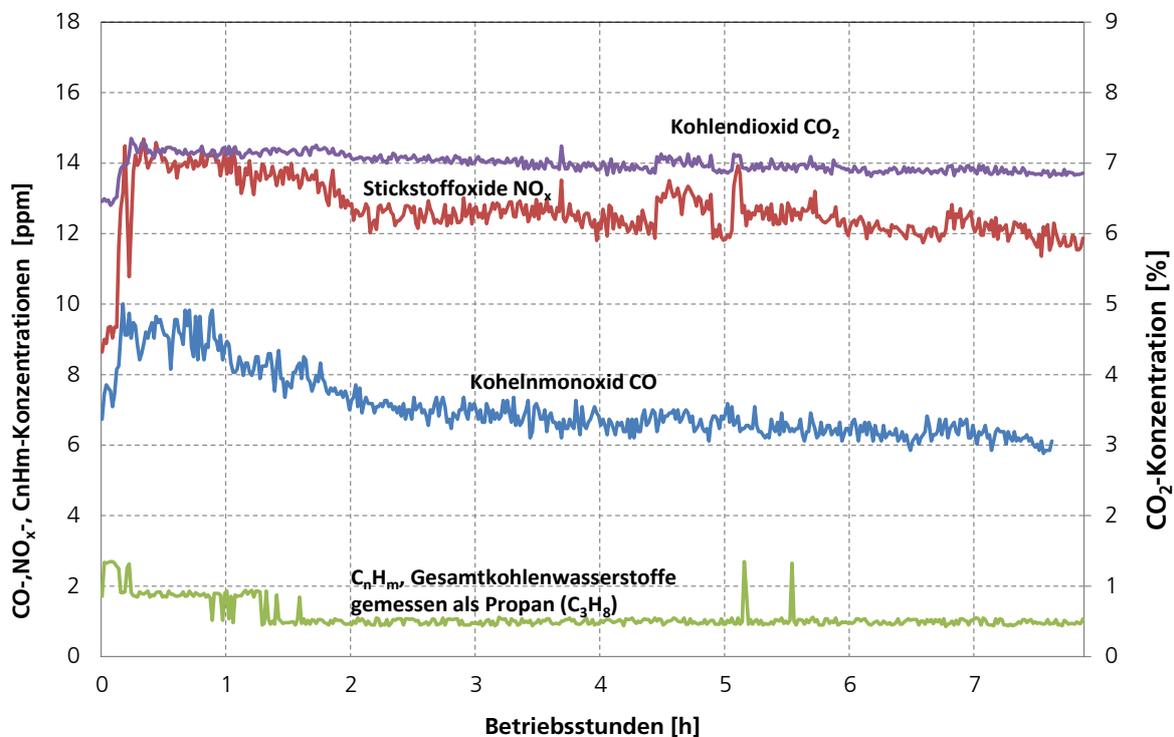


Diagramm 2: Gemessene CO-, NO<sub>x</sub>-, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen beim 8-stündigen Dauerbetrieb des Porenbrenners.

Tabelle 2: Emissionen beim Betrieb der Porenbrennertechnik in unterschiedlichen Leistungsbereichen.

Leistungsstufen <sup>(1)</sup>	Kohlenmonoxid (CO)	Kohlenwasserstoff <sup>(2)</sup> (C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> )	Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> )
[%]	[mg/Nm <sup>3</sup> ] <sup>(3)</sup>		
15	202	128	17
17	180	51	19
20	125	10	20
25	27	1	23
30	20	1	24
35	21	1	25
40	30	1	25
45	29	0	28
50	20	0	27
60	19	0	27
70	20	0	25
80	16	0	25
90	19	0	25
100	17	0	23

<sup>(1)</sup> Thermische Leistung des Brenners ist 26 kW.

<sup>(2)</sup> Gesamtkohlenwasserstoffe (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), gemessen als Propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)

<sup>(3)</sup> Sauerstoffgehalt im Abgas lag zwischen 12 Vol.-% und 14 Vol.-%.

In der Tabelle 2 ist ersichtlich, dass der Brenner ab einer Leistungsstufe von 25 % (ca. 6 kW) unabhängig von der eingestellten thermischen Leistung konstante Emissionswerte liefert. Es ist zu erwähnen, dass die in Tabelle 2 dargestellten Werte für eine bestimmte Einstellung der Brennstoff-Verbrennungsluftzufuhr gelten. Mit anderen Einstellungen sind noch bessere Werte zu erreichen.

### 3.1.2 Zugaben von staub- und gasförmigen Komponenten (Schadstoffe)

Durch die kontrollierte Zugabe staub- und gasförmiger Komponenten werden definierbare Konzentrationen gewünschter Schadstoffemissionen erzeugt und Abluft- und Abgasprozesse entsprechend simuliert. Hier wird zwischen der Zugabe von staub- und gasförmigen Schadstoffkomponenten unterschieden, welche entweder synthetisch bereitgestellt oder vor Ort erzeugt und in den Abgassimulator zugegeben werden.

#### 3.1.2.1 Bereitstellung und Zugabe gasförmiger Schadstoffemissionen

Die gasförmigen Komponenten werden synthetisch in Gasflaschen bereitgestellt. Folgende Schadgase können bisher in den Abgassimulator eingespeist werden:

- Brennbare gasförmige Komponenten wie z. B. Kohlenmonoxid (CO), Methan (CH<sub>4</sub>) und Propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), welche zum großen Teil bei unvollständiger Verbrennung entstehen.

- Nicht-brennbare gasförmige Komponenten wie z. B. Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) Chlorwasserstoff (HCl) und Fluorwasserstoff (HF). Diese sauren Schadstoffkomponenten können sowohl bei unvollständiger als auch bei vollständiger Verbrennung entstehen.
- Sonstige Schadgase wie Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S), Ammoniak (NH<sub>3</sub>), Distickstoffmonoxid bzw. Lachgas (N<sub>2</sub>O). Diese Gase spielen bei der Verbrennung von Biomasse nur eine untergeordnete Rolle.

Die Einspeisung der Schadgase in den Abgassimulator erfolgt durch eine selbstentwickelte Vorrichtung bzw. Methodik. Hier werden die Schadgase einer Mischstation über Druckminderer, Gasventile und Massendurchflussregler zugeführt, dort mit Druckluft gemischt und in den Abgassimulator transportiert wird, bevor sie in den Kernstrom des Abgases zugegeben werden. Um eine gleichmäßige Konzentrationsverteilung im gesamten Abgasstrom unabhängig von der im Abgasrohr strömenden Abgasmenge zu erreichen, werden diese Schadgase mit hoher Geschwindigkeit mittels Druckluft über eine spezielle Lanze im Gegenstrom zugegeben (Abbildung 5). Diese Methode der Zugabe hat sich bei den durchgeführten Untersuchungen sehr gut bewährt.

Zur Untersuchung der Oxidationsleistung der getesteten Strukturen wurde Kohlenmonoxid, Methan und Propan verwendet. Die Zugabe dieser Gase wird durch universell einzusetzende Massendurchflussregler gesteuert. Die Aufgabe von Massendurchflussreglern besteht darin, eine konstante Zugabe jeweiliger Schadgase sowie die Einstellung der Konzentration zu gewährleisten. Mit Hilfe einer SPS (eine speicherprogrammierbare Steuerung) mit einer entsprechenden Software, basierend auf TwinCAT 2 der Firma Beckhoff Automation Technology, werden die Massendurchflussregler gesteuert und somit die Zugabe grob geregelt. Die eingestellten Abgaskonzentrationen werden sekundlich gemessen und in einer Datenbank stetig abrufbar für die Auswertung gespeichert.



Abbildung 4: Massendurchflussregler für die Zugabe von Kohlenmonoxid, Methan und Propan (links) und die Einspeisungsstelle in den Abgassimulator (rechts).

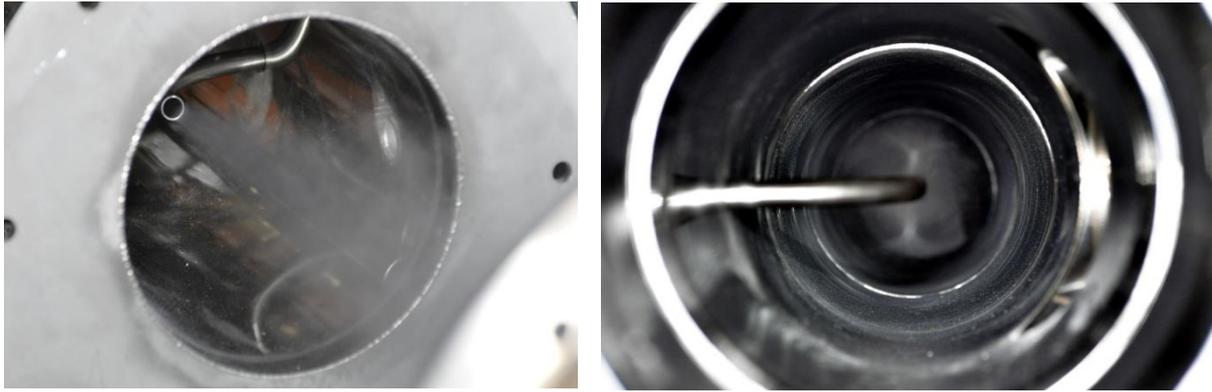


Abbildung 5: Spezielle Lanze für die Zugabe von staub- und gasförmigen Emissionen in den Abgassimulator.

Um eine repräsentative Probeentnahme bei der Messung der gasförmigen Komponenten unabhängig von der im Abgasrohr strömenden Abgasmenge zu erhalten, wird eine spezielle Messstrecke verwendet. Diese Strecke besteht aus einem glattwandigen Rohrstück mit einer Verengung des Querschnitts (von 150 mm bis 80 mm). Abbildung 6 verdeutlicht die Konstruktion sowie den Aufbau der Messstrecke mit den Entnahmestellen.

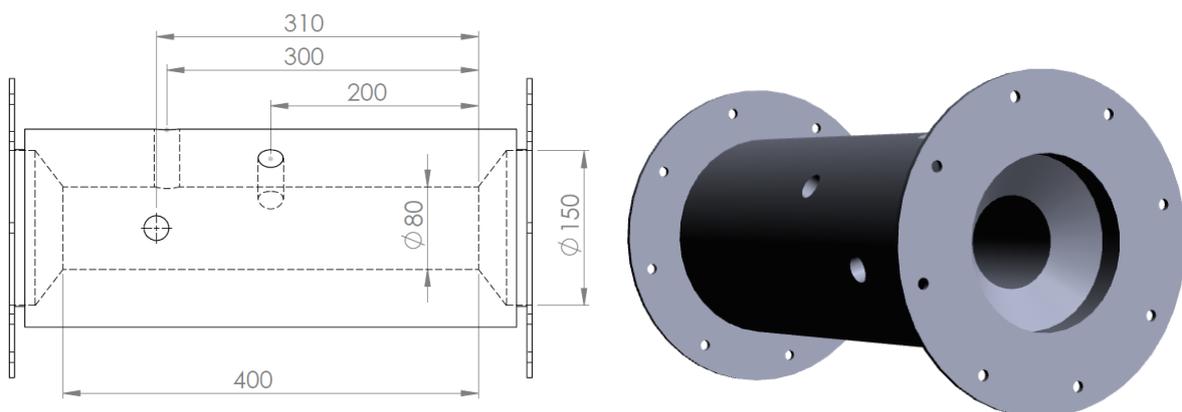


Abbildung 6: Abgasmessstrecke (Dimensionen in mm).

Die Abgasprobe wird dem gesamten Querschnitt der Messstrecke über zwei Rohre mit einem Durchmesser von 8 mm entnommen. Diese Rohre sind zentrisch gekreuzt im Querschnitt der Messstrecke aufgebaut und verfügen über 20 Probeentnahmeöffnungen (jeweils 10 Öffnungen), die über die gesamte Rohrlänge auf den beiden Strömungsseiten des Rohrs verteilt sind. Die entnommene Probe wird zentral durch ein Sammelrohr gesammelt, der Abgasanalyse zugeführt und dort analysiert.

### 3.1.2.2 Bereitstellung und Zugabe stauförmiger Schadstoffemissionen

Bei den staubförmigen Schadstoffemissionen ist zwischen groben (im Mikrometerbereich) und feinen Stäuben (im Nanometerbereich) zu unterscheiden.

### **Grobe Stäube (0,1 bis 100 µm)**

Grobe Stäube mit industriellem Ursprung werden synthetisch mit definierten Partikelgrößen und bestimmten mittleren Korngrößenverteilungen bereitgestellt. Hier sind sowohl organische als auch anorganische Stäube zu verwenden. Zur Dosierung dieser Stäube in den Abgassimulator wird das Dosier- und Dispergiersystem (RBG 1000I) der Firma PALAS eingesetzt. Dieses System (RBG 1000I) kann sowohl organische (Ruß) als auch anorganische (Salze) Stäube mit einem Durchsatz von 0,04 bis 430 g/h (bei angenommener Stopfdichte von 1 g/cm<sup>3</sup>) und Partikelgrößen zwischen 0,1 µm bis 100 µm dosieren (Abbildung 7). Der besondere Vorteil dieses Systems liegt darin, dass es für den Dauerbetrieb sowie für die Dosierung und Dispergierung komplexer Stäube wie z. B. fein gemahlene Verbrennungsgasche geeignet ist.

Die zu dosierenden Stäube werden in den zylindrischen Feststoffbehalter eingefüllt und mit einem Stopfer verdichtet. Nach der Einfüllung wird der Behälter in den Dispergierkopf des RGB eingebaut. Die verdichteten Stäube werden mit einem geregelten Transportkolben gegen eine rotierende Bürste vorgeschoben und dort mit Hilfe eines einstellbaren Druckluftstroms in den Abgassimulator über eine Lanze transportiert (Abbildung 7).

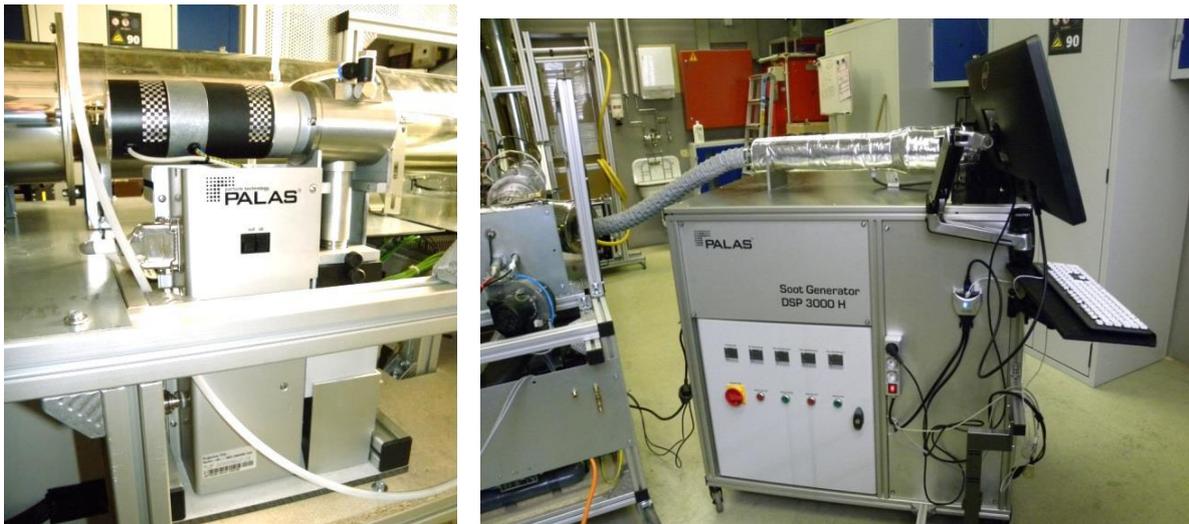


Abbildung 7: Dosier- und Dispergiersystem RBG 1000I (links), Ruß-Generator DSP 3000 H der Firma PALAS.

Um eine konstante gleichmäßige Zugabe und reproduzierbare Messungen zu erreichen, sind Anforderungen an das Dosiersystem, an die verwendeten Staubpartikel sowie an die Strömung im Abgasrohr einzuhalten. Hier sollten folgende Punkte besonders berücksichtigt werden:

- Die verwendeten Staubpartikel sollten keine kohäsiven Eigenschaften aufweisen. Kohäsive Stäube lassen sich nur ungleichmäßig dosieren.
- Art der Einfüllung des Staubbehalters des Dosier- und Dispergiersystems mit den Stäuben. Hier spielt die Verdichtung der Stäube eine besondere Rolle.

- Die Abgasmengen bzw. -geschwindigkeiten im Abgasrohr sollen deutlich höher als die Sedimentationsgeschwindigkeiten der Staubpartikel eingestellt werden. Hier soll die Dichte der Staubpartikel geringer als die Dichte des produzierten Abgases sein.
- Vor der Probenentnahme dürfen die Staubpartikel nicht elektrisch aufgeladen werden. Ansonsten werden sie an der Innenwand des Abgasrohrs abgeschieden.
- Vor der Probenentnahme sollte keine Unterschreitung der Taupunkttemperatur stattfinden. Beim Auftreten von Kondensation wird ein Teil der dosierten Stäube im Abgasrohr abgeschieden.
- Sehr feine Stäube ( $< \mu\text{m}$ ) können zwar dosiert werden, aber die Einstellung gewünschter Konzentrationen ist nur schwierig zu erreichen.

Es ist zu erwähnen, dass die oben genannten Zusammenhänge im Rahmen dieses Projektes während des Versuchsbetriebs des RBG 1000I festgestellt wurden.

### **Organische Feinstäube (Ruß) oder Aerosole**

Organische Feinstäube (von ca. 10 nm bis  $>200$  nm) werden durch einen Rußpartikel-Generator der Firma PALAS (defined Soot Particle Generator DSP 3000 H) produziert und im warmen Zustand bei einer Temperatur von  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  in den Abgassimulator eingespeist. Durch die Einstellung definierter Verbrennungszustände des Gasbrenners anhand der Einstellung des Brennstoff-Luft-Mischungsverhältnisses ( $\lambda$ ), kann eine bestimmte mittlere Partikelgröße und ein Partikelmassenstrom (von ca. 50 mg/h bis ca. 3 g/h) erzeugt werden. Hier gilt, je unvollständiger die Verbrennung ( $\lambda < 1$ ) ist, desto höher sind die zu erreichenden Rußpartikelkonzentrationen bzw. desto größer sind die produzierten Partikel. Die genaue Einstellung der Partikelkonzentrationen ( $\text{Partikel}/\text{cm}^3$ ) sowie der Korngrößenverteilung (5 nm bis 350 nm) erfolgt durch eine reale Messung mit dem SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) der Firma GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.KG. Die Abgasprobe wird nach Erreichen eines konstanten Betriebszustandes (konstante Temperatur, konstanten Abgasvolumenstrom und stabilen Druck) entnommen und analysiert.

Die Besonderheit des im DSP 3000 H verwendeten Brenners besteht in der Gewährleistung einer stabilen Partikelbildung bezüglich der Partikelgröße und Partikelkonzentration über eine lange Betriebszeit. Hier haben die Umgebungsbedingungen, wie Temperatur und Umgebungsdruck, nur sehr geringen Einfluss auf die Rußbildung.

Mit Hilfe einer Software können der gesamte Rußpartikel-Generator gesteuert und die gewünschten Betriebszustände zur Erzeugung vordefinierter Partikelgrößen und Partikelkonzentrationen eingestellt werden. Auf einem Display wird das Fließschema des DSP 3000 mit den jeweiligen Online-Werten aufgezeigt.

### 3.1.3 Messeinrichtung

Der Abgassimulator ist mit hochgenauen Messeinrichtungen zur Messung von staub- und gasförmigen Emissionen sowie zur Messung von Abgasparametern (wie z. B. Temperatur, Druck, Abgasgeschwindigkeit, Abgasvolumenstrom usw.) ausgerüstet, die für die Einstellung gewünschter Betriebszustände und für die Umrechnung der gemessenen Emissionswerte nötig sind.

Zur Abgasanalyse werden sowohl heißextraktive (GASMET: TTGASSYS001 der Firma Ansyco) als auch kaltextraktive (Advance Optima AO 2000 der Firma ABB AUTOMATION) Abgasanalysegeräte verwendet. Sie haben den Vorteil, dass sie für den Einsatz in rauen Betriebsbedingungen sowie für den Dauerbetrieb geeignet sind. Folgende Abgaskomponenten lassen sich kontinuierlich und mit hoher Genauigkeit messen:

- Typische Verbrennungsprodukte: Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ )
- Brennbare Abgaskomponenten aus unvollständiger Verbrennung: Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ), Gesamtkohlenwasserstoffe ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ).
- Nicht-brennbare saure Abgaskomponenten: Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ), Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ), Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Chlorwasserstoff ( $\text{HCl}$ ) und Fluorwasserstoff ( $\text{HF}$ ).

Zur Messung der Gesamtkohlenwasserstoffe ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ) wird auch der Kohlenwasserstoff-Analysator Thermo-FID der Firma SK-Elektronik eingesetzt. Je nach verwendetem Kalibriergas werden die gemessenen Konzentrationen entweder als Methan ( $\text{CH}_4$ ) oder als Propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) angegeben. Außerdem können sonstige Abgase wie z. B. Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Distickstoffmonoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Ethen ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), Ethan ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), Pentan ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), Methanol ( $\text{CH}_4\text{O}$ ) oder Formaldehyd ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) mit dem Abgasanalysator der Firma Ansyco (FTIR-Spektroskopie) nach einer entsprechenden Kalibrierung erfasst werden.

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

Die gravimetrische Staubmessung erfolgt nach VDI 2066-2. Hier wird das System GRAVIMAT SHC502 der Firma Sick verwendet. Dieses Staubmesssystem hat gegenüber herkömmlichen Staubmesssystemen den Vorteil, dass der Planfilter in einem speziellen Filterkopf direkt bei der Messung eingebaut und in die Abgasanlage eingeführt wird. Dieser Planfilter wird mit dem Filterkopf zusammen vor und nach der Probenentnahme abgewogen und die abgeschiedene Staubmenge entsprechend bestimmt. Dadurch werden keine Staubverluste in den langen Abgaswegen der Probenentnahme (Abgaslanze) wie bei den herkömmlichen Staubmesssystemen auftreten. Folglich kann eine

sehr genaue Staubmessung sowohl bei niedrigen als auch hohen Staubkonzentrationen realisiert werden.

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 µm) sowie die Bestimmung der Korngrößenverteilung für einen Partikelgrößenbereich von 5 nm bis 350 nm. Für die Messung hoher Feinstaubkonzentration (ca.  $> 10^{+8}$  Partikel/Ncm<sup>3</sup>) wird zusätzlich ein Verdünnungstunnel verwendet, um eine kontinuierliche Messungen im Dauerbetrieb zu realisieren bzw. technische Komplikationen im Staubzähler zu vermeiden.

Zusätzlich zu den oben erwähnten Messsystemen verfügt der Abgassimulator über Sensoren für die Messung von Abgastemperaturen, absolutem und relativem Druck und des Abgasvolumenstroms.

#### **3.1.4 Abgasfördersystem**

Das Abgasfördersystem besteht im Wesentlichen aus einem Saugzuggebläse, das bezüglich des gewünschten Unterdrucks im Abgassimulator zu steuern und zu regeln ist. Das Abgasfördersystem hat die Aufgabe, die produzierte Abgasmenge während des Betriebs sicher aus dem Abgassimulator zu fördern sowie den Druckverlust zu überwinden, der in der Abgasstrecke sowie im zu untersuchenden Prüfobjekt (wie z. B. Adsorber, Oxidationsreaktor, Katalysator, Elektrofilter usw.) verursacht wird.

Das Abgas wird über eine Abgasabzugshaube in einen Schornstein geleitet, der ständig über hohen Unterdruck für die sichere Absaugung der produzierten Abgase sowie der Abluft im Raum sorgt. Hier soll dadurch eine Luftwechselzahl von 10/Stunde sowohl während als auch außerhalb des Betriebes eingestellt werden.

#### **3.1.5 Steuerungs- und Regeleinheit und Datenerfassungssystem**

Die technischen Bestandteile (Porenbrenner, Zugabe von staub- und gasförmigen Komponenten, Abgasfördersystem) des Abgassimulators werden durch eine selbstentwickelte Einheit gesteuert und geregelt. Bei dieser Steuerungs- und Regeleinheit handelt es sich um eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Firma Beckhoff Automation Technology. Die Programmierung basiert auf der Software TwinCAT 2.



Abbildung 8: Regelung- und Steuerungseinheit des Abgassimulators.

Zusätzlich zur Steuerung und Regelung wird die SPS zur hochqualitativen Datenerfassung und –speicherung verwendet. Die Abtastrate (Anzahl der Messungen je Sekunde oder kurz Abtastfrequenz) kann hier beliebig auch im Millisekundenbereich eingestellt werden. Außerdem können die Messwerte auf dem Display visualisiert und der Verlauf der Messung ständig kontrolliert werden. Der Vorteil der SPS bezüglich der Anwendung im Abgassimulator liegt darin, dass sowohl die Hardware als auch die Software, je nach Anwendungsfall erweiterbar ist.

### 3.2 Charakteristiken und Anwendungen des Abgaslaborsystems

Bei der Konzeptionierung und Planung des Abgaslaborsystems wurde großer Wert darauf gelegt, dass es einfach, sicher, variabel, vielfältig und für den Dauerbetrieb eingesetzt werden kann. Im Folgenden sind die wichtigsten Charakteristiken und technischen Besonderheiten dargestellt:

- Hohe technische Modifizierbarkeit je nach Anwendungsfall.
- Einfach umkonstruier- und erweiterbar dank der innovativen Bauweise und des verwendeten Abgasrohrsystems.
- Vielfältige Einstellmöglichkeiten der physikalischen, chemischen sowie thermodynamischen Parameter unter reproduzierbaren Betriebs- und Rahmenbedingungen.
- Hohe Wiederholbarkeit- und -genauigkeit komplizierter Messungen unter bekannten und reproduzierbaren Randbedingungen.
- Automatische und sichere Betriebsweise.
- Hochgenaue und zuverlässige Messeinrichtungen.
- Bildung von Abgas bzw. Abluft aus unterschiedlichen industriellen Prozessen, wobei komplexe und ungünstige Betriebsfälle (Worst-Case-Szenarien) zu untersuchen sind.

Das Abgaslaborsystem wurde nicht nur für die Durchführung der im Rahmen dieser Forschungsarbeit geplanten Untersuchungen, sondern ferner auch für andere Entwicklungs- und Forschungszwecke konzipiert und aufgebaut. Hierbei sind Beispiele für mögliche experimentelle Untersuchungen aufgelistet:

- Entwicklung und Bewertung von Abgasbehandlungssystemen unter reproduzierbaren Bedingungen wie z. B.
  - Ermittlung von günstigen Betriebspunkten und –parametern,
  - Abscheideleistung von staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen,
  - aerodynamisches Verhalten bzw. Druckverlust,
  - Einfluss von Abgasparametern und Abgaskomponenten auf die Funktion,
  - Effektivität und Beständigkeit katalytischer Beschichtungen,
  - Aufnahmekapazität von Ab- und Adsorptionsmitteln.
- Stresstest für technische Abgaskomponenten (wie z. B. Sensoren, Abgasklappen usw.).
- Untersuchung des Alterungsverhaltens unterschiedlicher Aggregate (Ermittlung der Durchbruchkurve von Katalysatoren und Adsorber usw.).
- Entwicklung und Kalibrierung von Abgasmesssystemen und -strecken (Staubmessgeräte, Abgasanalysatoren usw.).

## **4 Experimentelle Untersuchungen**

In diesem Kapitel geht es um die experimentelle Untersuchung der Korrelation zwischen der Architektur von dreidimensionalen Strukturen und der Filtrations- und Oxidationsleistung von staub- und gasförmigen Emissionen bezüglich des Einsatzes in biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen als Filter-Reaktor-System.

### **4.1 Untersuchte Strukturen**

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 ganzen Querschnitt sowie über die gesamte Höhe des Aufbaus zeigen können. 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 (Abbildung 9).

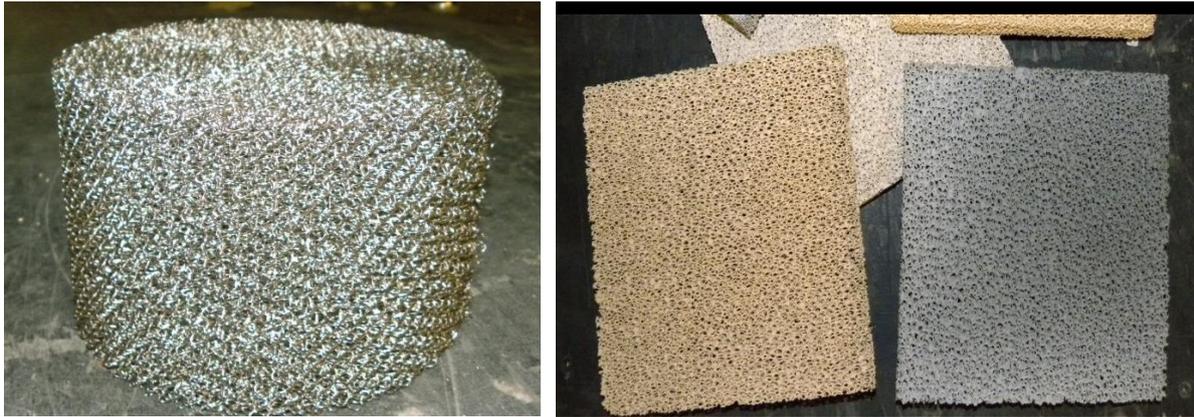


Abbildung 9: Beispiele für nicht-deterministische (Drahtgestrick, oben links und Schaumstruktur aus Nichtoxidkeramik, oben rechts) und deterministische keramische (Füllkörper, unten links) Strukturen.

Auf dem Markt ist eine Vielzahl von Strukturen erhältlich, die als Filter-Reaktor-Systeme in biomassebetriebenen Kleinf Feuerungsanlagen zum Einsatz kommen. Im Rahmen dieses Projektes wurden zwei Strukturen mit verschiedenen Materialien (Keramik und Metall) für jede Strukturgruppe untersucht. Diese Strukturen wurden als Module aufgebaut und getestet (Abbildung 10). Bei der Festlegung der Abmessungen der Module wurde die praktische Umsetzung in Einzelraumfeuerungsanlagen berücksichtigt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Untersuchte Strukturen mit den wichtigen Abmessungen der Module.

Struktur-Typen	Untersuchte Strukturen		Modul/Reaktor	
			Tiefe	Strömungsfläche
<b>Deterministische Strukturen</b>	Metallisch Füllkörper	Pall-Ring 35 mm	32	100
	Keramische Füllkörper	Pall-Ring 50 mm	32	100
<b>Nicht-deterministische Strukturen</b>	Schaumkeramik (Nichtoxidkeramik)	10 ppi (Porendichte)	2	100
	Drahtgestrick	Drahtstärke: 0,1 mm	10	100

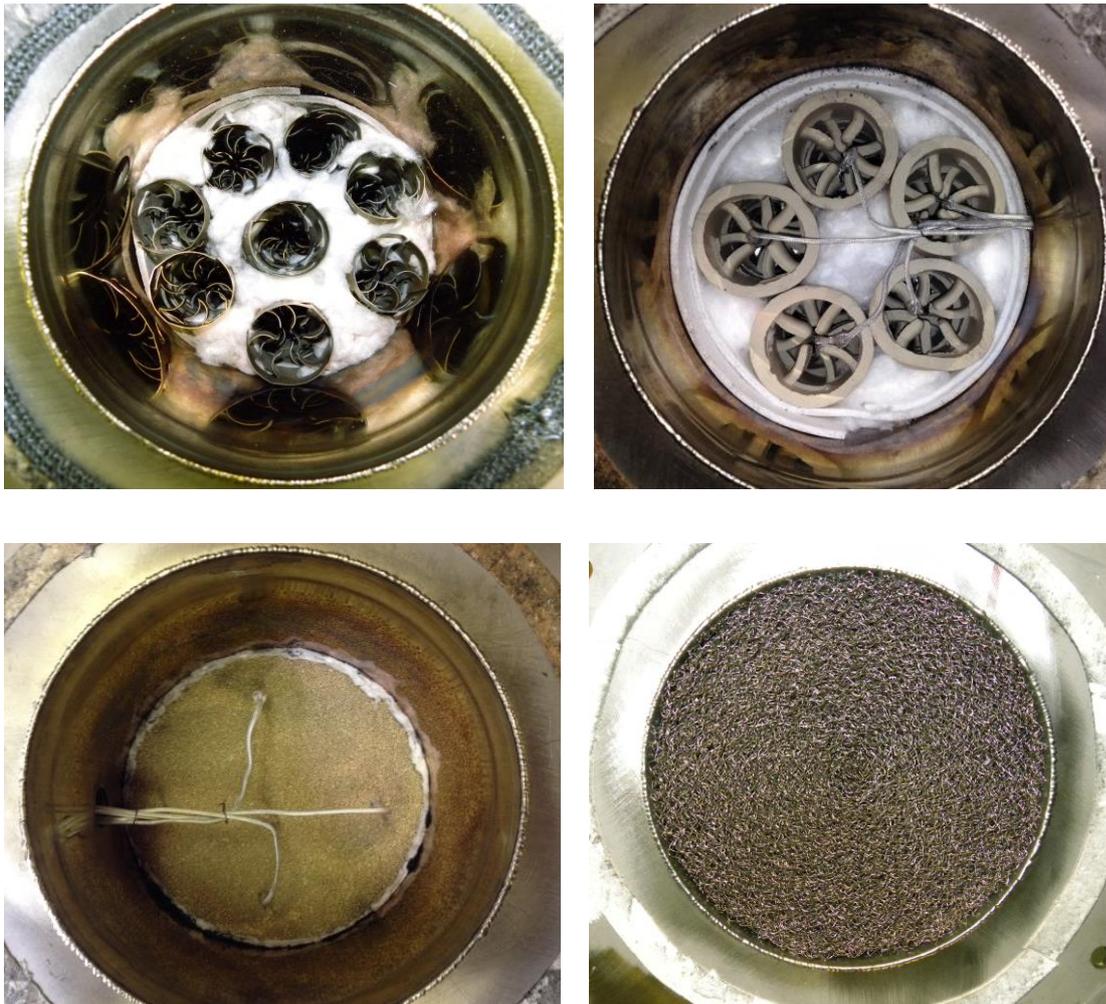


Abbildung 10: Aufbau der untersuchten Strukturen.

Es ist zu erwähnen, dass die keramischen Füllkörper so komplex (wie z. B. als Schüttung) aufgebaut werden können, dass eine nicht-deterministische Struktur bzw. ein nicht-deterministisches Modul hergestellt wird.

## 4.2 Bewertungskriterien

Die Bewertung der Architektur der zu untersuchenden Strukturen soll nach folgenden Kriterien erfolgen.

- Aerodynamisches Verhalten (Druckverlust)
- Beladungsverhalten und Selbstregenerierung (thermische Regenerierung)
- Oxidationsleistung oder Reduktionsgrad
- Abscheidegrad
- Thermische, chemische und mechanische Beständigkeit

#### 4.2.1 Aerodynamisches Verhalten (Druckverlust)

Das aerodynamische Verhalten beschreibt den Druckverlust in der Struktur in allen Betriebsphasen bzw. im Neuzustand vor der Beladung und während des Betriebs sowie nach der Abreinigung der Struktur. Besonders wichtig ist die Simulation der kritischen Betriebsphasen der Feuerungsanlagen, in der große Mengen problematischer Stäube entstehen.

Der Druckverlust stellt eine wichtige Größe für die Auslegung des Filter-Reaktor-Systems dar. Auf Basis dieser Größe wird die nötige Strömungsfläche sowie das gesamte Volumen des Filter-Reaktor-Systems festgelegt. Handbeschickte biomassebetriebene Einzelraumfeuerungsanlagen werden nur mit Naturzug und ohne jegliche Regelung betrieben. Schornsteine verfügen über sehr variablen Unterdruck. Er variiert je nach Höhe, Querschnitt, Konstruktion des Schornsteins und Witterungsverhältnissen sehr stark. Einzelraumfeuerungsanlagen werden gemäß den Prüfnormen bei einem Unterdruck von 12 ( $\pm 2$ ) Pa geprüft. Dieser Wert sollte bei der Auslegung des Filter-Reaktor-Systems sowie bei der Bewertung der Strukturen berücksichtigt werden.

#### 4.2.2 Beladungsverhalten und Selbstregenerierung (thermische Regenerierung)

Hier soll untersucht werden, wie schnell die Struktur mit dem Staub beim Auftreten ungünstiger Betriebsphase beladen wird und sich eigenständig und insbesondere ohne äußeren Eingriff von den abgeschiedenen Stäuben beim Erreichen einer günstigen Oxidationstemperatur befreien 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 Feuerungsanlagen (Anfahrbetriebsphase). Dieser Betriebszustand kann bei allen 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 trocknes Holz.
- Gestörte Verbrennungsluftzufuhr aufgrund niedrigen Abzugs im Kamin oder falscher Einstellung der Verbrennungsluft.
- Falsche Beschickung der Feuerungsanlage wie z. B. Einsatz größerer Brennstoffmasse oder sehr fein gehacktes Holz.

Die Architektur der Struktur spielt eine entscheidende Rolle sowohl beim Beladungsverhalten als auch bei der thermischen Selbstreinigung. Das Beladungsverhalten hängt sehr stark von den im Abschnitt 4.2.4 erwähnten 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 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 bis sie durch einen äußeren Eingriff mechanisch oder pneumatisch gereinigt werden.

#### 4.2.3 Oxidationsleistung oder Reduktionsgrad

Dieser Parameter beschreibt die Reduzierung der gas- und staubförmigen Schadstoffemissionen durch die thermische Behandlung bzw. Oxidation. Die Struktur (Filter-Reaktor-System) sorgt in diesem Zusammenhang dafür, dass die Oxidationsbedingungen (Temperatur, Sauerstoff und Verweilzeit) zu jedem Zeitpunkt des Betriebs begünstigt werden und die Oxidation gewährleistet werden kann. Bei der Reduktion werden die Schadstoffe thermisch zersetzt und oxidiert und meistens nicht zurückgebildet. Beispielsweise wird Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid ( $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$ ) und Kohlenwasserstoff zu Kohlenmonoxid als Zwischenprodukt, Wasser und Kohlendioxid ( $\text{C}_n\text{H}_m + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ ) als Endprodukte thermisch umgewandelt. Organische staubförmige Emissionen werden in Anwesenheit von Temperatur und Sauerstoff thermisch zersetzt. Die entstehenden Zersetzungsprodukte ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ) reagieren mit Sauerstoff und bilden die typischen Verbrennungsprodukte ( $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ ).

Der Reduktionsgrad der Feinstäube (zwischen 5 nm und 1  $\mu\text{m}$ ) wird durch das Staubzählverfahren bestimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Reduktionsgrad der Feinstäube für die Beurteilung der Strukturen nicht eingesetzt.

#### 4.2.4 Abscheidegrad

Der Abscheidegrad beschreibt die Minderung der staubförmigen Schadstoffemissionen ( $> 1 \mu\text{m}$ ) durch die mechanische Abscheidung, unabhängig davon, ob die Stäube organischer oder anorganischer Herkunft sind. Hier wirken folgende Trennmechanismen:

- Sedimentation durch die Schwerkraft,
- Fliehkraftabscheidung,
- Trägheitseffekt durch die Trägheitskraft,
- Sperrereffekt,
- Diffusions- und Adsorptionseffekt.

Die Messung des Abscheidegrades erfolgt gravimetrisch gemäß VDI 2066-1. Hier werden alle Partikel erfasst, die sich auf den verwendeten Planfilter des Staubmessgerätes abscheiden lassen. Feine Partikel, die den Planfilter passieren können, werden durch einen Staubzähler gezählt bzw. erfasst.

#### 4.2.5 Thermische, chemische und mechanische Beständigkeit

Die im Filter-Reaktor-System verwendeten Strukturen sollten hohe chemische, thermische und mechanische Beständigkeit aufweisen. Optimal sollte das Material der Struktur eine ähnliche Lebensdauer wie das Material der Feuerungsanlage aufweisen.

Eine sehr wichtige Anforderung an das Material der Struktur ist die thermische Beständigkeit. Diese beschreibt die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber Temperatureinflüssen sowie Temperaturwechsel während des Betriebs. In Kleinfeuerungsanlagen schwanken die Temperaturen stark. Im Einsatzbereich des Filter-Reaktor-Systems sind Abgastemperaturen zwischen 300 °C und 850 °C in Nennlastbetrieb zu erwarten. Im Überlastbetrieb werden Abgastemperaturen von bis zu 1.000 °C erreicht.

Abgas aus der Verbrennung von Biomasse beinhaltet aggressive Gaskomponenten wie z. B.  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ , die sowohl die chemische Korrosion als auch die Hochtemperaturkorrosion bei metallischen Strukturen verursachen können. Die chemische Korrosion wird durch aggressive Säuren wie z. B. Schwefelsäure, Salpetersäure begünstigt, welche bei der Kondensierung des Abgases aufgrund von Temperaturabsenkungen entstehen. Hochtemperaturkorrosion kann bei allen Prozessen auftreten, die bei Temperaturen deutlich oberhalb von 100 °C arbeiten.

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 durch die Struktur ein hoher Verschleiß bzw. Abrieb des Materials, vor allem bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Dies verursacht Erosion, die mit der Zeit zu Materialermüdung bzw. zu Zerstörung der Struktur führt.

Im Rahmen dieses Projektes wird die thermische, chemische und mechanische Beständigkeit der Strukturen nicht untersucht. Die Strukturen werden gemäß den Herstellerangaben über die chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Materials sowie den Beobachtungen während der Untersuchungen bewertet.

#### 4.3 Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Typen von Strukturen (deterministische und nicht-deterministische) gemäß den unten dargestellten Aspekten und bezüglich des Einsatzes in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen bewertet.

- Aerodynamisches Verhalten (Druckverlust),
- Beladungsverhalten,
- Oxidationsleistung oder Reduktionsgrad von Kohlenmonoxid  $\text{CO}$  und Propan  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,

- Filtrationsleistung für staubförmige Schadstoffe (Ruß)
  - Abgas- bzw. Modultemperatur (350 °C)
  - Abgas- bzw. Modultemperatur (700 °C).

Im Folgenden werden die Untersuchungen mit den Ergebnissen dargestellt und diskutiert.

#### 4.3.1 Aerodynamisches Verhalten (Druckverlust)

Beim Einsatz von Filter-Reaktor-Systemen in Einzelraumfeuerungsanlagen ist der Druckverlust von großer Bedeutung. Handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen werden nur mit Naturzug und ohne zusätzliche Abgasförderung betrieben. Jede Druckverlustserhöhung in der Feuerungsanlage sowie im Abgassystem soll durch den im Schornstein verfügbaren Unterdruck (zwischen 8 Pa und 40 Pa) ausgeglichen werden. Für die Bewertung der Strukturen sowie Auslegung des Filter-Reaktor-Systems wird ein Unterdruck von 12 Pa angenommen, welcher bei der Typprüfung einzuhalten ist.

Wichtig ist die Entwicklung des Druckverlustes während des Betriebs und besonders beim Auftreten ungünstiger Betriebszustände, bei denen in der Regel hohe Staubbelastung entsteht. Eine unkontrollierte schnelle Erhöhung des Druckverlustes während des Betriebs sollte vermieden werden, weil dadurch nicht nur eine hohe Umweltbelastung sondern auch eine Gefährdung der Nutzer aufgrund des Austretens gefährlicher Abgase in den Aufstellraum auftreten kann.

Diagramm 3 zeigt die gemessenen Druckverluste der untersuchten Strukturen im Neuzustand bei einer Abgastemperatur von 700 °C und unterschiedlichen Abgasvolumenströmen. Alle Strukturen haben eine Strömungsfläche von ca. 100 cm<sup>2</sup>. Die Tiefe der Strukturen wurde gemäß der technischen Umsetzung in der Praxis festgelegt. Beispielsweise kann beim Einsatz von Füllkörpern eine Tiefe bis 50 cm realisiert werden, wobei bei Schaumkeramik eine maximale Strukturtiefe bzw. -dicke von 2,5 cm einzusetzen ist.

Aus Diagramm 3 ist ersichtlich, dass die nicht-deterministischen Strukturen höhere Druckverluste aufweisen als die deterministischen Strukturen, obwohl sie über eine geringere Tiefe bzw. ein geringeres Volumen als die deterministischen Strukturen (metallische und keramische Füllkörper) verfügen. Hier spielt die Architektur der Struktur eine entscheidende Rolle. Je kleiner und komplizierter die Abgaswege bezüglich der Form sowie des Verlaufs innerhalb der Struktur sind, umso höher ist der Strömungswiderstand und somit der Druckverlust. Außerdem spielen die Oberflächeneigenschaften der Struktur bzgl. des Druckverlusts eine wesentliche Rolle. Der Druckverlust steigt mit zunehmendem Reibungsbeiwert an.

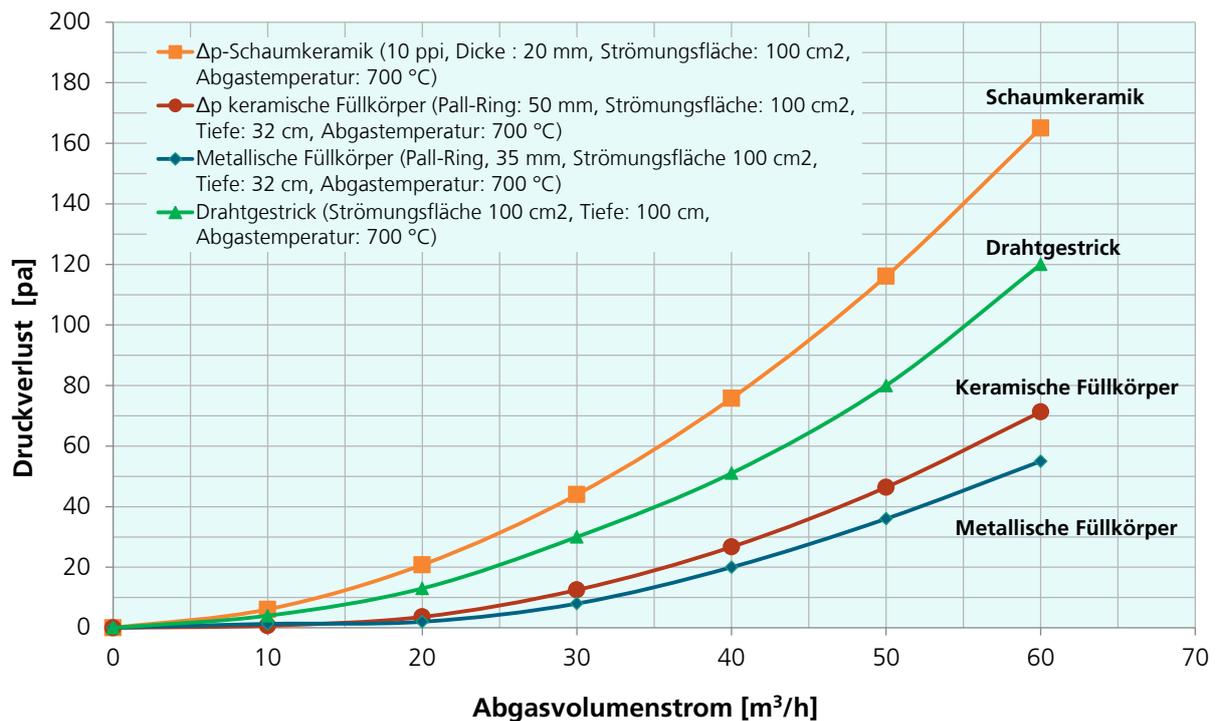


Diagramm 3: Druckverlust der untersuchten Strukturen im Neuzustand.

Die oben dargestellten Druckverlustverläufe werden für die Berechnung der nötigen Strömungsfläche und infolgedessen auch für die Dimensionierung des Filter-Reaktor-Systems eingesetzt. Beispielsweise ergeben sich bei einem maximalen empfohlenen Druckverlust im Neuzustand von 2 Pa und einer Abgastemperatur von 700 °C die in der Tabelle 4 dargestellten Flächenbelastungen. Diese Flächenbelastungen werden für die Berechnung der benötigten Strukturfläche eingesetzt.

Beispielsweise wird beim Betrieb einer Feuerungsanlage mit einer thermischen Nennwärmeleistung von 8 kW bis ca. 50 m³/h produziert. Für diesen Abgasvolumenstrom ergeben sich die in der Tabelle 5 angegebenen Flächen.

Tabelle 4: Empfohlene Flächenbelastung der untersuchten Strukturen.

Kategorien		Schaumkeramik (Nichtoxidkeramik)	Drahtgestrick	Keramische Füllkörper	Metallische Füllkörper
Abgastemperatur	[°C]	700	700	700	700
Druckverlust	[Pa]	2	2	2	2
Tiefe (Dicke)	[cm]	2	10	32	32
Strömungsfläche	[cm²]	100	100	100	100
Abgasvolumenstrom	[m³/h]	5	8	17	20
Flächenbelastung	[m³/m².h]	<b>Flächenbelastung [m³/m²/h] = Abgasvolumenstrom [m³/h] / Strömungsfläche [m²]</b>			
		500	800	1.700	2.000

Tabelle 5: Nötige Strömungsflächen für eine Feuerungsanlage mit einer thermischen Nennwärmeleistung von ca. 8 kW.

Kategorien		Schaumkeramik (Nichtoxidkeramik)	Drahtgestrick	Keramische Füllkörper	Metallische Füllkörper
Abgasvolumenstrom	[m <sup>3</sup> ]	50	50	50	50
Flächenbelastung	[m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h]	500	800	1.700	2.000
<b>Strömungsfläche [m<sup>2</sup>] = Abgasvolumenstrom [m<sup>3</sup>/h] / Flächenbelastung [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h]</b>					
Nötige Fläche	[m <sup>2</sup> ]	0,100	0,063	0,029	0,025

Zur Auslegung des Filter-Reaktor-Systems ist die Bestimmung der Dauer des Filtrationszyklus (Standzeit oder Zeit zwischen zwei Abreinigungen) von besonderer Bedeutung. Dabei spielen die Staubbelastung sowie die Filtrationsleistung (Abscheidegrad) der verwendeten Struktur eine entscheidende Rolle. Hier gilt, je höher die Staubbelastung und Filtrationsleistung der Struktur ist, umso schneller steigt der Druckverlust an und umso kürzer wird die Standzeit bzw. umso häufiger muss die Struktur gereinigt werden. Da die Staubbelastung bei der Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen sehr stark variiert, ist es immer schwierig eine genaue Aussage über die Standzeit zu treffen. Im Rahmen dieses Projekts wurde das Beladungsverhalten bei hoher Staubbelastung zur Simulation ungünstiger Betriebszustände untersucht.

#### 4.3.2 Beladungsverhalten und Selbstreinigung (thermische Regenerierung)

Die Untersuchung des Beladungsverhaltens der Struktur ist sehr wichtig für den sicheren Betrieb der Einzelraumfeuerungsanlagen in Wohnbereichen. Eine schnelle (partielle oder komplette) Verstopfung der Struktur während des Betriebs darf nicht erfolgen, weil sie zum Austreten gefährlicher Abgase in die Umgebung und somit zur Gefährdung der Nutzer führt. Das Austreten der Abgase sowie der Feinstäube an die Umgebung erfolgt zum großen Teil beim Nachlegen von Holz.

Auf Grundlage einer Untersuchung des Beladungsverhaltens kann ermittelt werden, wie schnell der Druckverlust in der Struktur des Filter-Reaktor-Systems bei hoher Staubbelastung und ungünstiger Abgastemperaturen (kleiner als die Oxidationstemperatur) auftritt, die normalerweise bei einer unvollständigen Verbrennung emittiert werden. Erfahrungsgemäß kann beim Einsatz von nassem oder sehr trockenem Holz bis zu 10.000 mg/m<sup>3</sup> Staub (im Vergleichszustand) emittiert werden, der zu einem überwiegenden Anteil aus organisch oxidierbaren Partikeln besteht.

Bei der Untersuchung wurde synthetischer Ruß verwendet. Nach Einstellung der Temperaturen (zwischen 340 °C und 360 °C) und des Abgasvolumenstroms (zwischen 40 Vm<sup>3</sup>/h und 45 Vm<sup>3</sup>/h) wurde das Dosier- und Dispergiersystem RBG 1000I der Firma PALAS auf eine maximale Förderleistung von 430 g/h eingestellt, um die gewünschte Konzentration von ca. 10.000 mg/Vm<sup>3</sup> produzieren zu können. Bei dieser Untersuchung wurden die eingestellten Konzentrationen nicht gemessen, sondern durch den

eingestellten Abgasvolumenstrom sowie die zugegebene Rußmenge berechnet. Diese hohen Konzentrationen sind nur bedingt durch das verwendete Staubmessgerät zu erfassen.

In Diagramm 4 sind die Druckverlustverläufe während des Beladungsvorgangs dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass bei metallischen und keramischen Füllkörpern während des Beladungsvorgangs keine Druckverlusterhöhung festzustellen ist. Das ist mit den großen Abgaswegen (3,5 cm bei metallischen und 5 cm bei keramischen Füllkörpern) zu begründen. Die Abscheidung des Staubs erfolgt ausschließlich durch die Adhäsion (Adsorption), die Schwerkraft und durch die Trägheitskraft. Bei Schaumkeramikstruktur und Drahtgestrick erfolgt die Abscheidung durch den Sperreffekt. Der Staub wird sowohl an der Oberfläche als auch tief in der Struktur abgeschieden. Das führt zur Erhöhung des Strömungswiderstands aufgrund der partiellen Blockierung der Abgaswege und somit zur Erhöhung des Druckverlustes, wie in Diagramm 4 zu sehen ist.

Weiterhin ist in Diagramm 4 zu sehen, dass der Druckverlust im Drahtgestrick (0,69 Pa/min) um 30 % schneller ansteigt als in der Schaumkeramikstruktur (0,48 Pa/min). Dieser Effekt kann auf die größere Dicke des Drahtgestrick-Moduls zurückgeführt werden. Die Dicke des Drahtgestrick-Moduls (10 cm) war um das Fünffache größer als die untersuchten Schaumkeramik-Platten (2 cm).

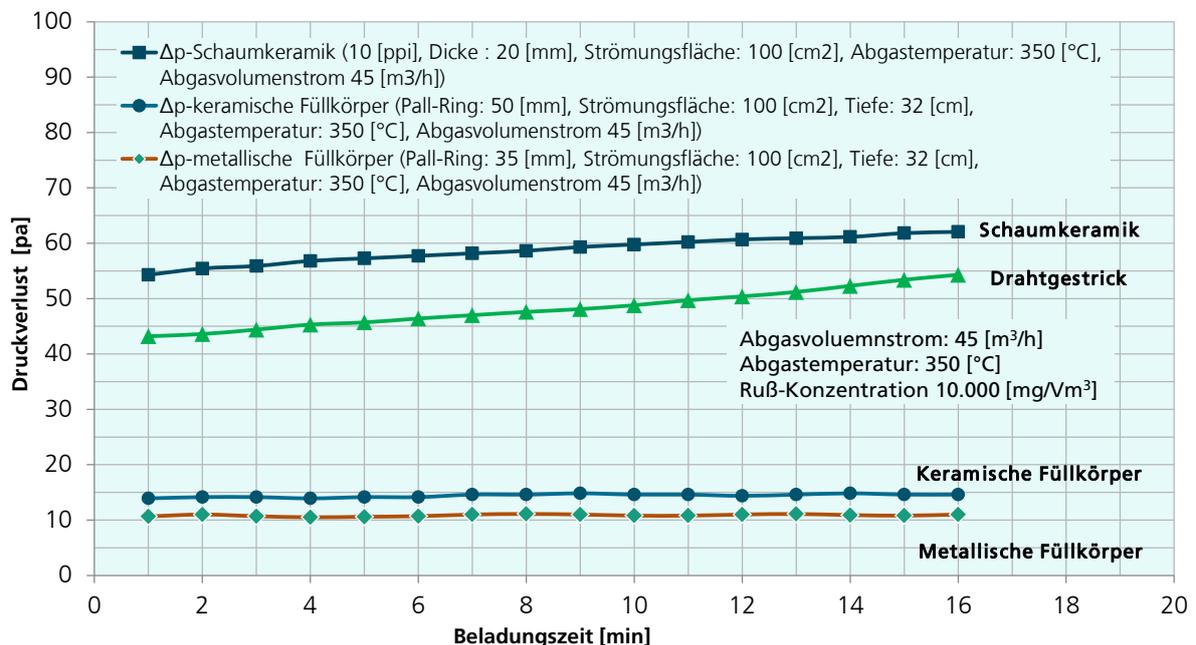


Diagramm 4: Beladungsverhalten der untersuchten Strukturen.

Die thermische Regenerierung der Strukturen wurde nach der Beladung bei einer Temperatur von ca. 550 °C durchgeführt. Bei metallischen und keramischen Füllkörpern dauert der Regenerierungsvorgang ca. 12 Minuten. Nach der Regenerierung wurden keine Rußablagerungen in den Modulen

beobachtet, die normalerweise vor der Regenerierung zu bemerken sind. Diese ausgesuchte Regenerierungsdauer von ca. 10 Minuten entspricht der minimalen Dauer der Betriebsphase der Einzelraumfeuerungsanlagen, in der die Abgastemperatur im Einsatzbereich des Filter-Reaktor-Systems über 550 °C bleiben kann. Hier konnte die Druckverluständerung bzw.-absenkung nicht als Indikator für die Vervollständigung der Regenerierung verwendet werden, da bei der Beladung keine wesentliche Druckverlustserhöhung gemessen werden konnten (Diagramm 4).

Bei der Regenerierung von Schaumkeramikstruktur sowie Drahtgestrick wurde die Druckverlustveränderung als Indikator für die Vervollständigung der Regenerierung verwendet. Der Regenerierungsvorgang wurde beim Erreichen eines konstanten Druckverlusts beendet und als vollständig abgeschlossen erachtet. Die Regenerierung von Schaumkeramikstruktur dauerte zwischen 7 Minuten und 10 Minuten, während es beim Drahtgestrick über 12 Minuten dauerte, bis sich ein konstanter Druckverlust einstellen konnte.

Im Allgemeinen hängt die Dauer der Regenerierung von der Temperatur sowie der Wärmeverteilung innerhalb der Struktur ab. Je höher die Temperatur und gleichmäßiger die Wärmeverteilung innerhalb der Struktur ist, umso schneller kann die Regenerierung ablaufen. In der Praxis kann die für die Regenerierung nötige Temperatur durch die Auswahl eines günstigen Einsatzortes in der Feuerungsanlage sichergestellt werden. Das Filter-Reaktor-System soll so nah wie möglich am Feuerraum (aktive Reaktionszone) eingebaut werden. Hier muss darauf geachtet werden, dass die Verbrennungsluftzufuhr (Menge und Verteilung im Feuerraum) sowie die Abgasförderung durch das Filter-Reaktor-System nicht gestört wird.

### 4.3.3 Oxidationsleistung (Reduktionsgrad) von Kohlenmonoxid und Propan

Die Oxidation gasförmiger Emissionen wird durch die Einstellung günstiger Oxidationsbedingungen (Sauerstoff, Temperatur und Verweilzeit) innerhalb der Struktur begünstigt. Die Struktur soll ausreichend Wärme für die Oxidation speichern sowie eine intensive Durchmischung der brennbaren Abgasbestandteile mit der Verbrennungsluft gewährleisten. Dadurch soll die aktive Verweilzeit verlängert werden, in der die Oxidationsreaktionen ablaufen können.

Im Rahmen dieses Projekts wurde die Leistung der im Abschnitt 4.1 erwähnten Strukturen für die Oxidation von Kohlenmonoxid (CO) und Propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) bei der Verbrennung bei unterschiedlichen Temperaturen (von 350 °C bis 700 °C) und Anfangskonzentration für Kohlenmonoxid von 10.000 ppm und für Propan von 1.000 ppm untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sind in Diagramm 5 und in Diagramm 6 dargestellt. In beiden Diagrammen sind die Endkonzentrationen (C, gemessen nach dem Modul) zu den Anfangskonzentrationen (C<sub>0</sub>, gemessen vor dem Modul) auf die Primär-y-Achse eingetragen. Auf der Sekundär-y-Achse ist die Oxidationsleistung oder der Reduktionsgrad dargestellt. Um die Oxidationsleistung der Strukturen genau bestimmen zu können, wurde die Oxidationsleistung des leeren Rohrs (Rohrstrecke zwischen den Probeentnahmestellen vor und nach dem Modul)

ohne Modul für die jeweiligen Betriebspunkte bestimmt und von den ermittelten Oxidationsleistungen bzw. Reduktionsgraden mit den eingebauten Modulen abgezogen.

Diagramm 5 und Diagramm 6 zeigen die Oxidationsleistung bzw. den Reduktionsgrad für Kohlenmonoxid und Propan. Es ist in den beiden Diagrammen zu ersehen, dass die Oxidationsleistung bei allen Strukturen mit steigenden Temperaturen ansteigt und stark von der Verweilzeit im Modul abhängt. Bei metallischen und karmischen Füllkörper-Modulen waren die Reduktionsgrade für Kohlenmonoxid und Propan deutlich höher als bei Schaumkeramik und Drahtgestrick. Diese bessere Oxidationsleistung bzw. der höhere Reduktionsgrad für Kohlenmonoxid ist auf die längere Verweilzeit zurückzuführen, die sich in diesen Modulen bezüglich des Einsatzes in Einzelraumfeuerungsanlagen einstellen lässt.

Beim Einsatz von metallischen und keramischen Füllkörpern ist eine Verweilzeit von 0,5 Sekunden eingestellt. Diese Zeit stellt die durchschnittliche Verweilzeit dar, die in Einzelraumfeuerungsanlagen in der Praxis realisiert werden kann. Erfahrungsgemäß ist beim Einsatz von Füllkörpern im Filter-Reaktor-System eine Verweilzeit bis 1,5 Sekunden ohne Probleme zu realisieren. Schaumkeramik wird in der Regel mit einer Dicke von 20 bis 25 mm hergestellt. In Bezug auf den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen kann eine maximale Verweilzeit von 0,03 Sekunden erreicht werden. Das Drahtgestrick kann mit einer Dicke von bis zu 100 mm eingebaut werden, wodurch eine maximale Verweilzeit von 0,05 Sekunden zu realisieren ist.

In Diagramm 5 und Diagramm 6 ist ersichtlich, dass die Oxidationsleistung bei keramischen Füllkörpern deutlich höher ist als bei metallischen Füllkörpern, obwohl die Verweilzeit bei beiden Füllkörper-Modulen gleich war. Das kann auf unterschiedliche Gründe 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 Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit eine Rolle, die die Bereitstellung der gespeicherten Wärme für die Oxidation beeinflussen kann.

Im Diagramm 7 ist auch deutlich zu erkennen, dass der Reduktionsgrad für Kohlenmonoxid höher ist als für Propan. Das ist mit der niedrigeren thermischen Stabilität des Propans im Vergleich zum Kohlenmonoxid zu begründen. Diagramm 7 zeigt die Oxidationsleistung bzw. den Reduktionsgrad für Kohlenmonoxid im Vergleich zum Propan. Es ist hier zu erwähnen, dass das Propan thermisch nicht direkt zu Wasser und Kohlendioxid umgewandelt wird. Bei der thermischen Zersetzung von Propan entstehen Zwischenprodukte wie z. B. Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ), die bei Anwesenheit von Sauerstoff und ausreichend hohen Temperaturen zu Wasser und Kohlendioxid aufoxidiert werden können.

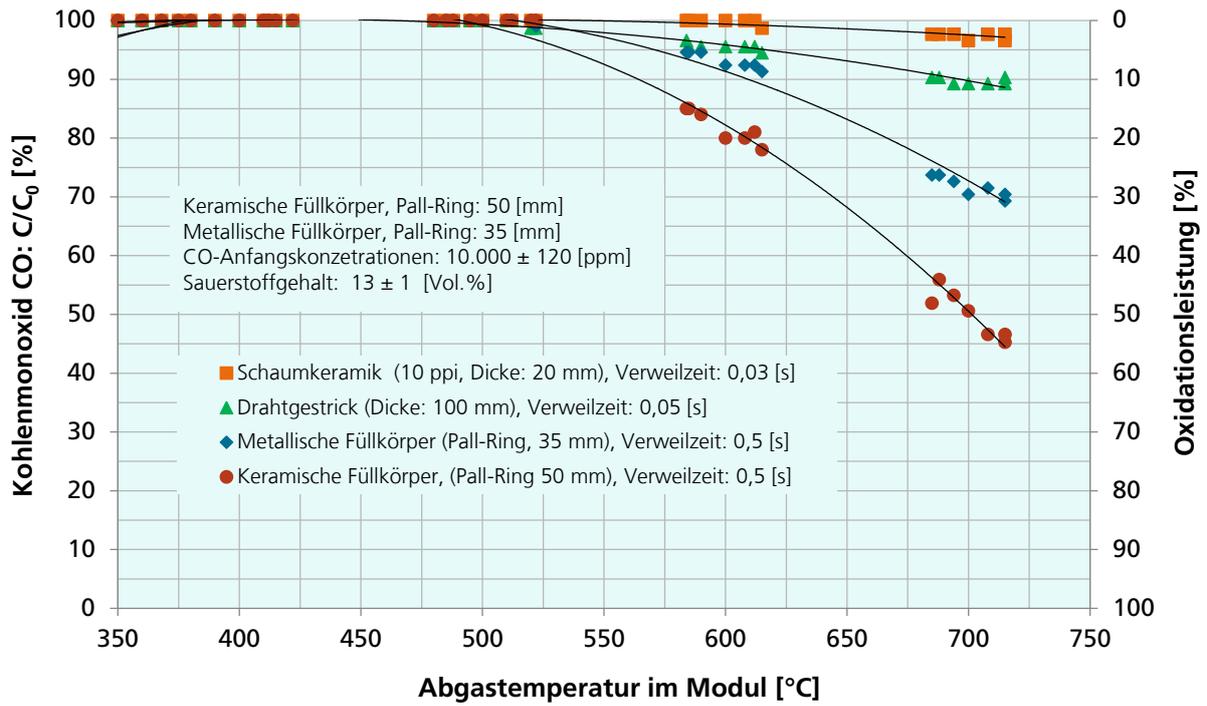


Diagramm 5: Reduktionsgrade von Kohlenmonoxid (CO) in den untersuchten Strukturen.

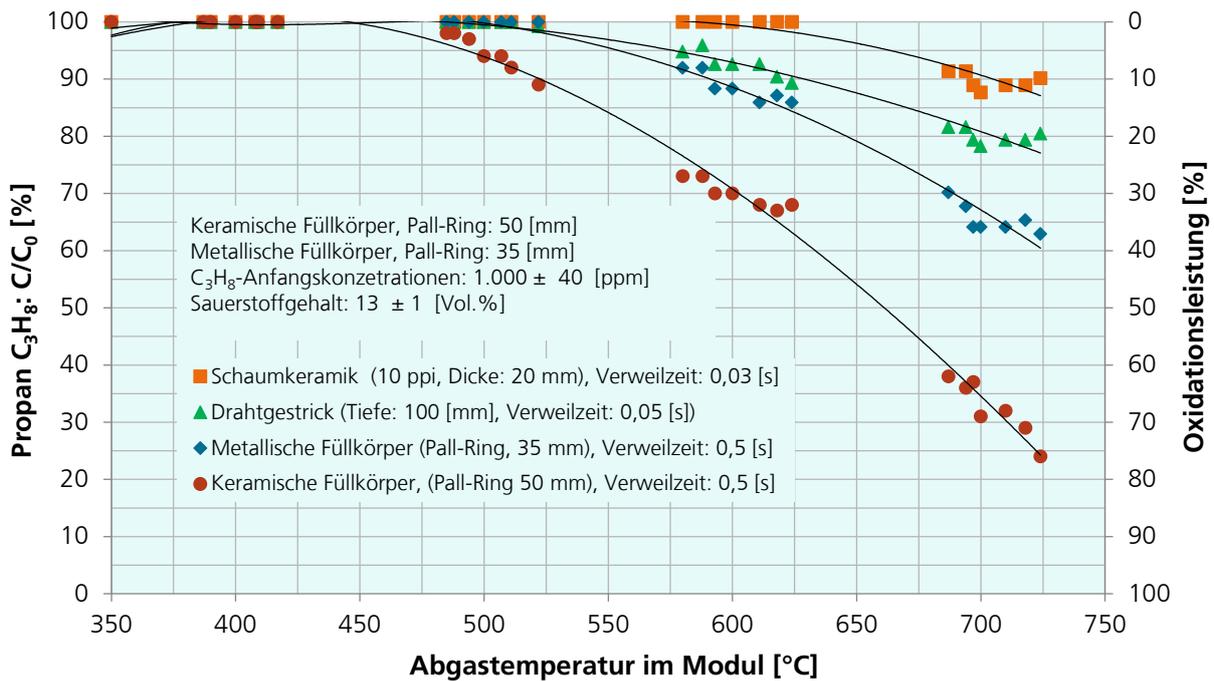


Diagramm 6: Reduktionsgrad des Propan ( $C_3H_8$ ) in den untersuchten Strukturen.

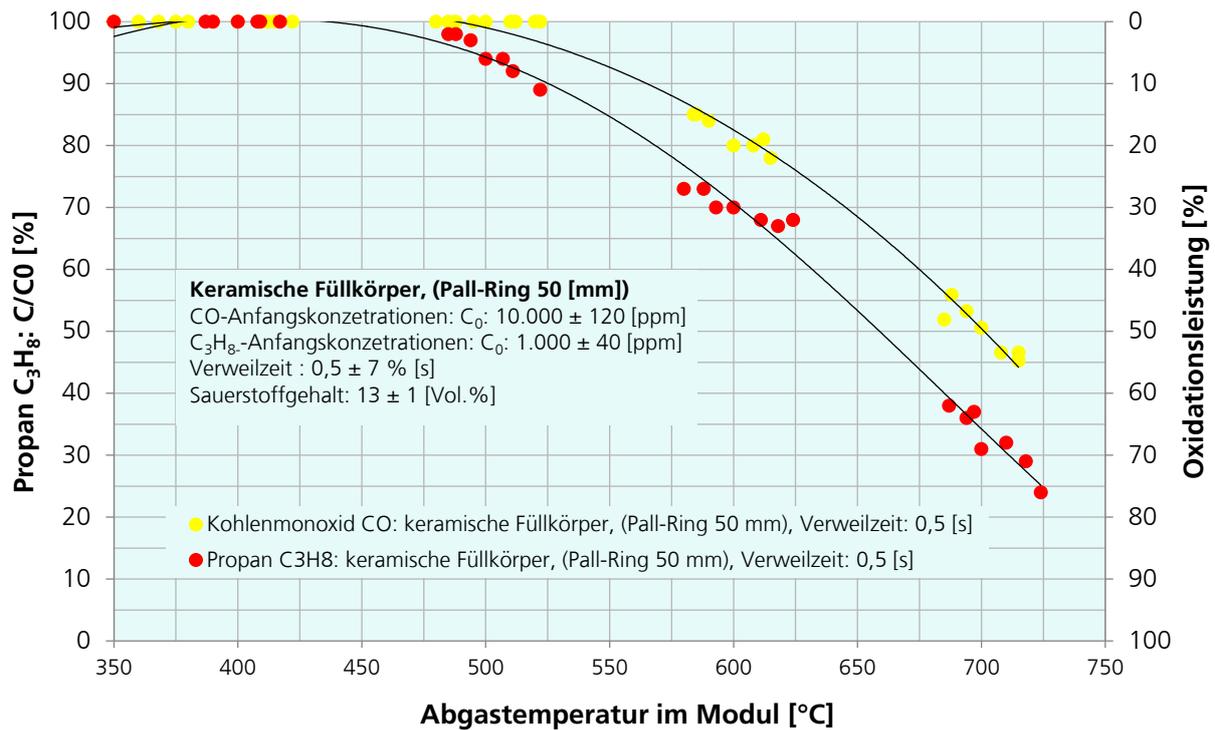


Diagramm 7: Oxidationsleistung, Vergleich Kohlenmonoxid (CO) und Propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>).

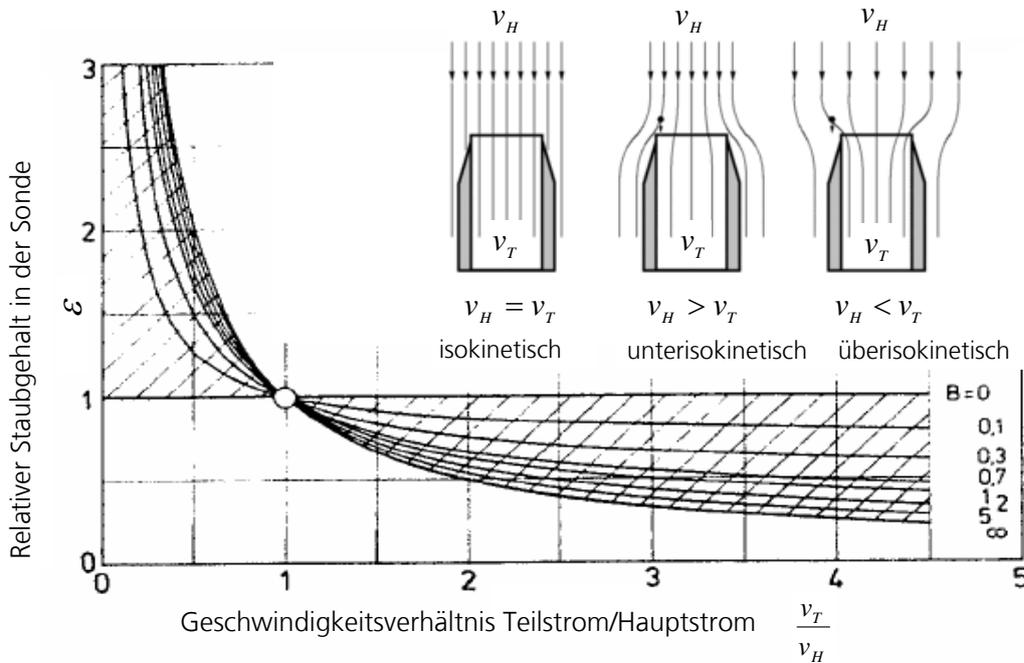
Für die Auslegung des Filter-Reaktor-Systems ist die Ermittlung der Oxidationsleistung der Füllkörperstruktur bei unterschiedlichen Verweilzeiten sehr wichtig. Diese Strukturen haben gegenüber andern Strukturen den Vorteil, dass die Verweilzeit im großen Bereich (bis 1,5 Sekunden) eingestellt werden kann. Die Verweilzeit hat einen großen Einfluss auf die Festlegung der Dimensionen des Filter-Reaktor-Systems.

#### 4.3.4 Filtrationsleistung für staubförmige Schadstoffe (Ruß)

Die Filtrationsleistung der untersuchten Strukturen wurde bei Abgas- bzw. Modultemperaturen zwischen 350 °C und 700 °C ermittelt. Bei dieser Untersuchung wurden Anfangskonzentration des Staubs (Ruß) von ca. 500 mg/Vm<sup>3</sup> eingestellt. Dabei wurde der Ruß (Dichte: 1,8 g/cm<sup>3</sup> bis 1,86 g/cm<sup>3</sup>) der Firma Kremer Pigmente GmbH & Co. KG verwendet. Die Einstellung der Staubkonzentrationen hängt von der Dosierung der Staubmenge ab. Bei der Staubdosierung durch das Dosier- und Dispergiersystem (RBG 1000I, siehe Abschnitt 3.1.2.2) spielen die Eigenschaften des zu dosierenden Staubs sowie die Stopfdichte im Feststoffbehälter des RBG 1000I eine wesentliche Rolle. Hier muss darauf geachtet werden, dass die zu dosierenden Stäube bei der Stopfung in das Dosier- und Dispergiersystem nicht kohäsiv oder feucht sind. Mit der Dosierung von Ruß wurden im Rahmen dieses Projektes sehr gute Erfahrungen bezüglich der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gemacht.

Bei der Bestimmung der Staubkonzentration ist die Art der Probenentnahme von großer Bedeutung. Bei den durchgeführten Staubmessungen wurde

überisokinetisch abgesaugt. Dabei wurde die Abgasprobe mit einer konstanten Absauggeschwindigkeit von 2 m/s abgesaugt. Diese Absauggeschwindigkeit entsprach ca. dem Fünffachen der durchschnittlichen Abgasgeschwindigkeit, die im Abgasrohr während der Messung herrschte. Bei überisokinetischen Probenentnahmen ist eine genauere und reproduzierbarere Staubmessung zu erreichen als bei unterisokinetischen Probenentnahmen [Zenker 1971].



$$\varepsilon = \frac{v_H}{v_T} + \left(1 - \frac{v_H}{v_T}\right) \cdot \left(1 + \exp(1,04 + 2,06 \cdot \log B)\right)^{-1}$$

$$B = (v_H \cdot w_G) / g \cdot D_T$$

$D_T$ : Durchmesser der Probenahmesonde  
 $B$ : Ähnlichkeitskennzahl  
 $w_G$ : Sinkgeschwindigkeit der Staubpartikel  
 $g$ : Erdbeschleunigung (9,81 m/s<sup>2</sup>)

Diagramm 8: Fehler bei verschiedenen Geschwindigkeitsverhältnissen bei der gravimetrischen Staubmessung [Zenker 1971].

Diagramm 8 zeigt den relativen Staubgehalt in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis von Teilstrom/Hauptstrom ( $v_T/v_H$ ) und der Ähnlichkeitskennzahl  $B$ , welche die Sinkgeschwindigkeit der sich im Abgas befindenden Partikel und den Durchmesser der Sonde berücksichtigt. In Diagramm 8 ist zu erkennen, dass der Fehler bei der isokinetischen Probenentnahme gleich Null ist und bei kleineren Absauggeschwindigkeiten steil ansteigt (bzw. bei der unterisokinetischen Probenentnahme). Im Bereich der hohen Teilstromgeschwindigkeiten (bzw. bei der überisokinetischen Probenentnahme) und bei zu erwartender Ähnlichkeitskennzahl  $B$  zwischen 0 bis 0,1 ist der Fehler sehr klein und vor allem ab einem Geschwindigkeitsverhältnis von 1,5 praktisch konstant.

Die oben geschilderten Erfahrungen und Kenntnisse über die Probenentnahme wurden bei der Staubmessung bezüglich der Messunsicherheit berücksichtigt.

#### 4.3.4.1 Filtrationsleistung bei Abgas- bzw. Modultemperatur von 350 °C

Bei einer Temperatur von 350 °C wird keine Oxidation bzw. thermische Zersetzung der Rußpartikel in der Struktur stattfinden. Die Abscheidung der Partikel erfolgt rein mechanisch durch die im Abschnitt 4.2.4 erwähnten Trennmechanismen.

Diagramm 9 zeigt die eingestellten sowie die gemessenen Staubkonzentrationen bei den durchgeführten Untersuchungen. Es ist zu ersehen, dass eine maximale Abscheideleistung bzw. ein maximaler Abscheidegrad von 24 % erreicht wurde. Außerdem verfügen die nicht-deterministischen Strukturen (Schaumkeramik und Drahtgestrick) über einen besseren Abscheidegrad als die deterministischen Strukturen (metallische und keramische Füllkörper).

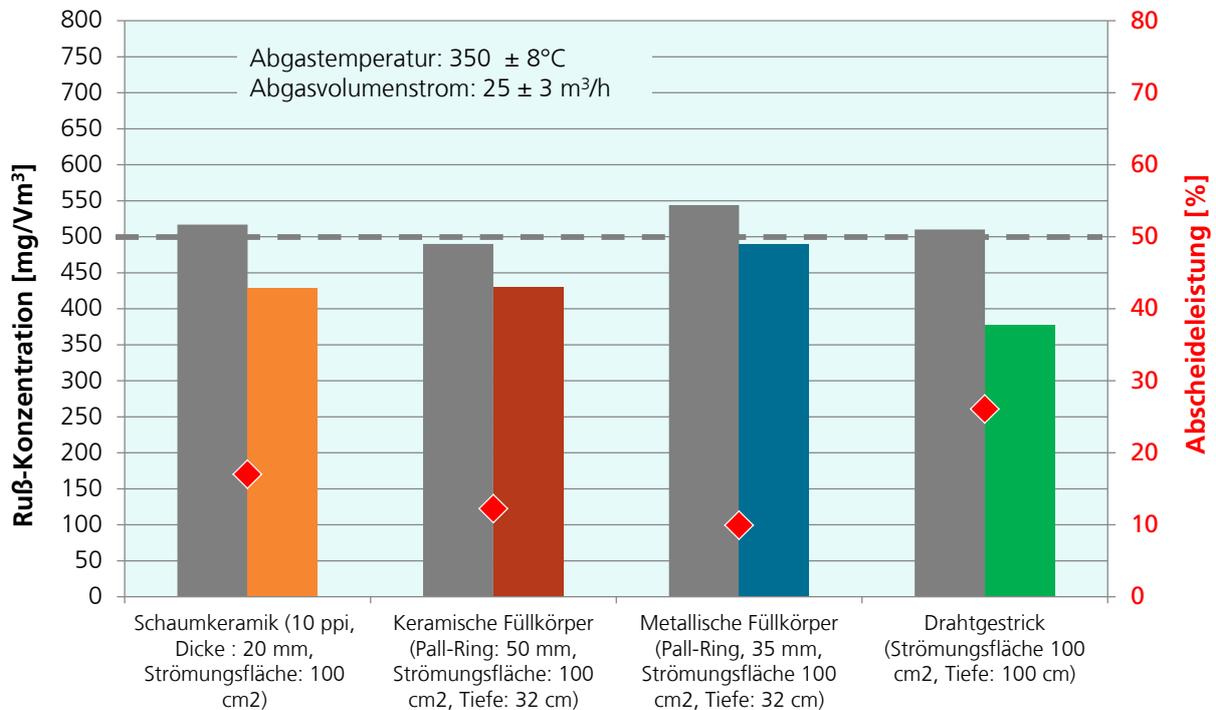


Diagramm 9: Abscheideleistung für Staub, Ruß > 1µm, 350 °C.

Die mechanische Abscheideleistung hängt im Wesentlichen von der Partikeldichte sowie der Partikelgröße ab. Je nach Architektur der Struktur kommen unterschiedliche Trennmechanismen zum Tragen.

Bei feinen Strukturen wie z.B. bei Schaumkeramik und Drahtgestrick spielt der Sperreffekt die entscheidende Rolle bei der Abscheidung. Hier gilt, je feiner und tiefer die Struktur ist, umso höhere Abscheideleistungen sind zu erreichen. Die gute Abscheideleistung der feinen Strukturen ist mit dem

Nachteil behaftet, dass der Druckverlust während des Betriebs bemerkbar ansteigt sowie die thermische Regenerierung mit zunehmender Strukturtiefe anspruchsvoller wird, wie bei den Untersuchungen zum Beladungsverhalten festgestellt wurde (siehe Abschnitt 4.3.2).

Die Abscheidung in Füllkörpermodulen bei Temperaturen, die kleiner als die nötige Oxidationstemperatur sind, erfolgt hauptsächlich über die Schwerkraft durch die Adhäsion sowie durch die Sedimentation. Aufgrund der sehr großen Abgaswege ( $> 3$  cm) spielt der Sperreffekt bei der Abscheidung keine Rolle. Abbildung 11 zeigt die Beladung der Schaumplatten aus Nichtoxidkeramik (links) sowie der Füllkörper-Module (keramische Pall-Ringe, 50 mm) mit Ruß während der Anfahrphase beim Betrieb einer Einzelraumfeuerungsanlage (DIN EN 13240) mit einer thermischen Nennwärmeleistung von 8 kW. Wie dieser Abbildung entnommen werden kann, findet die Rußabscheidung auf der Oberfläche sowie tief in der Schaumkeramikstruktur statt. Im Füllkörper-Modul wird der Ruß an den Wänden der Füllkörper adsorbiert. Beim Erreichen einer günstigen Oxidationstemperatur werden die abgeschiedenen Rußpartikel bzw. die organischen Partikel thermisch zersetzt und die Struktur dadurch regeneriert (Abbildung 12).

Bei der Verbrennung in biomassebetriebenen Feuerungsanlagen besteht der gebildete Staub sowohl aus organischen als auch aus anorganischen Partikeln, die sich thermisch nicht zersetzen und somit abreinigen lassen. Sollen die anorganischen Partikel durch die Struktur gefiltert werden, muss die Struktur beim Erreichen eines bestimmten Druckverlusts (bezüglich des Einsatzes in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen von 3 bis 5 Pascal) durch äußeren Eingriff mechanisch oder pneumatisch gereinigt werden. Ab einer Dicke der Struktur von 50 mm wird die Reinigung technisch sehr anspruchsvoll und die Struktur muss dann ersetzt werden.

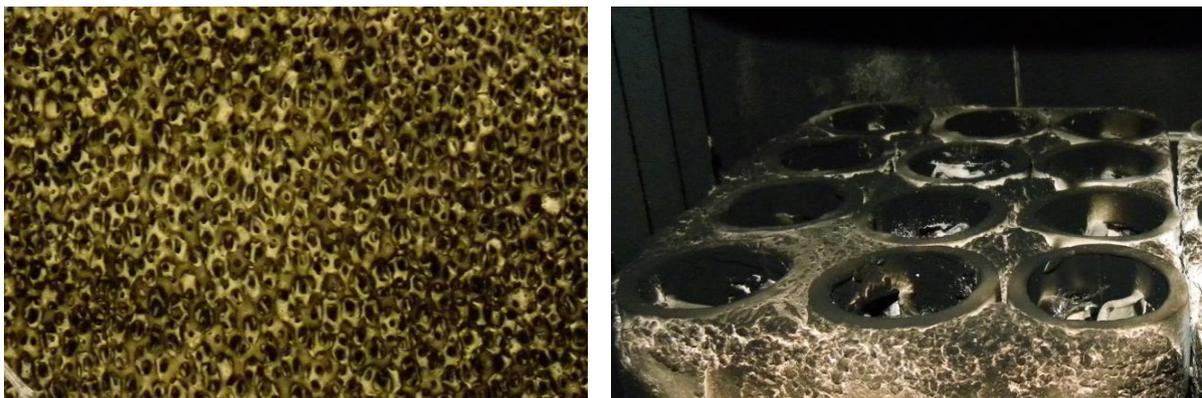


Abbildung 11: Beladung der Schaumplatten aus Nichtoxidkeramik (links) sowie Füllkörper-Module (keramische Pall-Ringe, 50 mm) mit Ruß während der Anfahrphase eines Kaminofens.



Abbildung 12: Schaumplatten aus Nichtoxidkeramik (links) sowie Füllkörper-Module (keramische Pall-Ringe, 50 mm) nach der thermischen Regenerierung bzw. während der Regelbetriebsphase eines Kaminofens.

Abbildung 11 zeigt die Schaumkeramik-Platten (links) sowie Füllkörper-Module (rechts) im Praxisbetrieb nach 100 Abbränden bzw. nach der Verbrennung von ca. 180 kg Scheitholz. Bei diesen Versuchsreihen ist der Druckverlust in Schaumkeramik-Platten von 3 Pa (im Neuzustand) auf 9 Pa angestiegen. Bei einem Druckverlust von 7 Pa hat sich die Verbrennung aufgrund der Störung der Verbrennungsluftzufuhr massiv verschlechtert. Im Füllkörper-Modul hingegen ist der Druckverlust zwischen 0,8 und 1,5 Pa konstant geblieben.

#### 4.3.4.2 Filtrationsleistung bei Abgas- bzw. Modultemperatur von 700 °C

Bei hohen Temperaturen ( $> 500\text{ °C}$ ) wird die Minderung der organischen Partikel sowohl durch die mechanische Abscheidung als auch durch die thermische Zersetzung bzw. Oxidation während der Strömung der Partikel in die Struktur bzw. in das Modul verstärkt. Dabei werden die Rußpartikel in Anwesenheit von Wärme und Sauerstoff vergast. Die Vergasungsprodukte ( $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$  usw.) reagieren anschließend mit Sauerstoff und es entstehen daraus die Verbrennungsprodukte Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ).

Diagramm 10 zeigt die eingestellten sowie die ermittelten Staubkonzentrationen mit den Abscheidegraden bei einer Temperatur von ca. 700 °C. Wie aus dem Diagramm 9 sowie dem Diagramm 10 zu entnehmen ist, steigt die Abscheideleistung bei keramischen Füllkörpern von ca. 12 % auf ca. 47 % und bei metallischen Füllkörpern von ca. 9 % auf 27 % an, wenn die Temperatur von 350 °C auf 700 °C ansteigt. Hier wurde die Abscheideleistung rund um das 3,5-fache bei keramischen Füllkörpern und um das 3-fache bei metallischen Füllkörpern verbessert. Bei der Schaumstruktur aus Nichtoxidkeramik sowie dem Drahtgestrick wurden kaum Verbesserungen der Abscheideleistung von 30 % erzielt, obwohl die Messungen mit der gleichen Temperatur (700 °C) durchgeführt wurden. Die bessere Abscheideleistung bei metallischen und keramischen Füllkörpern ist mit der längeren aktiven Verweilzeit der Partikel im Modul sowie der besseren Durchmischung der brennbaren Partikel mit dem Sauerstoff zu begründen.

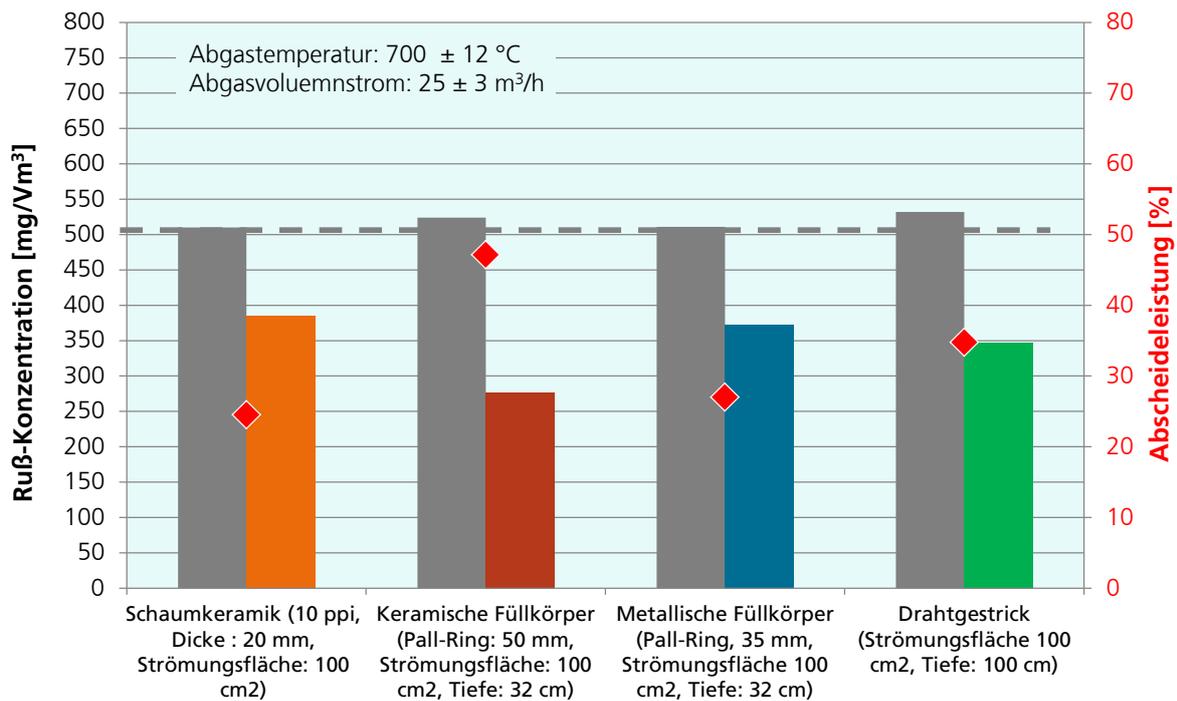


Diagramm 10: Abscheideleistung für Staub, Ruß > 1µm, 700 °C.

Bei der Abscheidung der staubförmigen brennbaren Emissionen spielen die Oberflächeneigenschaften der Strukturen eine wesentliche Rolle. Raue Oberflächen mit adhäsiven Eigenschaften wie bei keramischen Füllkörpern können mehr Partikel abscheiden als glatten Oberflächen wie z. B. bei metallischen Füllkörpern. Außerdem ist die spezifische und gesamte Oberfläche des Strukturmaterials von großer Bedeutung. Hier gilt, je größer die Oberfläche ist, umso mehr Partikel können adsorbiert und anschließend thermisch zersetzt werden.

#### 4.4 Bewertung der untersuchten Strukturen

Die Bewertung der untersuchten Strukturen wird bezüglich des Einsatzes in handbeschickten biomassebetriebenen Feuerungsanlagen gemäß folgenden Kriterien durchgeführt und in Tabelle 6 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 Kohlenmonoxid (CO) und Propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)
- Reduktion staubförmiger Emissionen am Beispiel Ruß als typisches Produkt bei unvollständiger Verbrennung
- Potential zur Effizienzerhöhung im Praxisbetrieb
- Thermische und mechanische Stabilität im Dauerbetrieb

- Wirtschaftlichkeit

Es ist zu erwähnen, dass die in der Tabelle 6 dargestellte Bewertung nicht nur auf Basis der in diesem Projekt erhaltenen Ergebnisse durchgeführt wurde, sondern auch auf den Kenntnissen und Erfahrungen der Gruppe Verbrennungssysteme des Fraunhofer Instituts für Bauphysik IBP mit dem Betrieb von Filter-Reaktor-Systemen in Kleinf Feuerungsanlagen beruht, in denen diese Strukturen als Filter oder Filter-Reaktor-Systeme verwendet wurden.

Tabelle 6: Bewertung der Struktur bezüglich des Einsatzes in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen.

Kategorien	Nicht-deterministische Strukturen		Deterministische Strukturen	
	Schaumkeramik (Nichtoxidkeramik)	Drahtgestrick (Edelstahl)	Keramische Füllkörper	Metallische Füllkörper
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

In der Tabelle 6 lässt sich deutlich erkennen, dass sich die deterministischen Strukturen gut für den Einsatz in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen eignen. Ein Nachteil der nicht-deterministischen Strukturen liegt in der schnellen Entwicklung des Druckverlustes während des Betriebs, wodurch zusätzlich zur Verstopfungsgefahr eine aufwendige, häufige Abreinigung des Systems erforderlich ist. Bei einer partiellen Verstopfung kann die Verbrennungsluftzufuhr gestört und somit die Verbrennung verschlechtert werden und das Abgas kann aus der Feuerungsanlage in den Aufstellraum 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 Verstopfung oder Defekten die Systeme durch die Nutzer abgebaut und nicht mehr ersetzt werden. Da die Einzelraumfeuerungsanlagen keiner wiederkehrenden Überwachung unterliegen, wird diese konstruktive Änderung nicht bemerkt und die Feuerungsanlage ohne Filter weiter betrieben. Diese Beurteilung basiert auf den Praxiserfahrungen der Gruppe Verbrennungssysteme des Fraunhofer Instituts für Bauphysik mit solchen Systemen. Zusätzlich dazu lassen sich die nicht-deterministischen Strukturen nur schwierig bis unmöglich konstruktiv gleich und reproduzierbar anfertigen, was zu anderen Strömungsverhältnissen und somit Emissions- und Verbrennungswerten bei dem Einsatz unterschiedlicher Schaumkeramik-Platten führen kann. In der Praxis werden solche Strukturen (bzw. Filter) nicht dicht eingebaut. Es ist gemäß der Prüfnormen (wie z. B. DIN EN 13240) eine zusammenhängende freiströmende Fläche von minimal 20 cm<sup>2</sup> um die Platten frei zu lassen oder ein Bypass in der 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 und die gewünschte Funktion nicht mehr erreicht wird.

Im Rahmen dieses Projektes wurde festgestellt, dass die nicht-deterministischen Strukturen gut als Filter aber nicht als Reaktor agieren können. 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.

Deterministische Strukturen haben den Vorteil, dass der Druckverlust beim Auftreten ungünstiger Betriebszustände (siehe Abschnitt 4.2.2) nicht schnell ansteigt und folglich Zustände vermieden werden können, bei denen ein Austreten von Abgasen in den Aufstellraum der Feuerungsanlagen oder hohe Schadstoffbelastungen an die Umwelt erfolgen. Durch dieses Druckverlustentwicklungsverhalten sowie durch die nicht manipulierbare Bauweise, werden Filter-Reaktor-Systeme auf Basis der untersuchten deterministischer Strukturen sicher und zuverlässig betrieben. Im Allgemeinen können bei deterministischen Strukturen höhere Verweilzeiten (bis 1,5 Sekunden) realisiert werden, als bei nicht-deterministischen Strukturen, ohne dabei Probleme mit Druckverlust erhöhungen im Dauerbetrieb zu erhalten. Deterministische Strukturen agieren sowohl als Feinstaubfilter, als auch als Reaktoren. Durch die Bereitstellung günstiger Oxidationsbedingungen, ausreichend lange aktive Verweilzeit, hoher Temperaturen und sehr intensiver Durchmischung des Sauerstoffs mit den brennbaren Bestandteilen in der Struktur, werden sowohl die organischen Feinpartikel als auch die brennbare Schadgase aufoxidiert und somit behandelt. Zusätzlich zu dem hohen Potential der Schadstoffminderung tragen die deterministischen Strukturen durch die besondere konstruktive Bauweise maßgeblich zur Effizienzerhöhung der Anlagen bei. In diesem

Projekt wurden die deterministischen Strukturen bzw. die Module aus auf dem Markt verfügbaren metallischen und keramischen Füllkörpern angefertigt. Es sind Füllkörper bzw. deterministische Strukturen gezielt zu entwickeln, die das Funktionsprinzip des Filter-Reaktor-Systems unterstützen und ein hohes Potential zur Minderung staub- und gasförmiger Schadstoffemissionen besitzen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Biomasse ist ein Brennstoff für die Ewigkeit und wird zunehmend zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser in Haushaltsbereichen eingesetzt. Jede Anstrengung, die zu einer Weiterentwicklung geeigneter und verbesserter Verbrennungstechnik führt, ist lohnenswert und trägt zum aktiven Klimaschutz bei. Allerdings lassen sich die ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile der thermischen Nutzung von Biomasse nur durch den Einsatz effizienter und emissionsarmer Verbrennungstechnologien erreichen.

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, weil sie in der Regel eine sichere Funktion bezüglich der Schadstoffminderung und Effizienzerhöhung, unabhängig von der Bedienungsqualität der Feuerungsanlagen zeigen und sich sowohl einfach technisch als auch wirtschaftlich einsetzen lassen. Bei solchen Technologien spielt die Architektur der Struktur eine entscheidende Rolle, da dadurch die gesamte Leistung des Systems, vor allem die Oxidationsleistung sowie die Stabilität des Betriebs, stark beeinflusst werden kann. Die vorliegende Arbeit befasst sich hauptsächlich mit der Entwicklung einer technischen Einrichtung (dem sogenannten Abgassimulator) und Methodik für die Untersuchung und Bewertung unterschiedlicher Strukturen zum Einsatz als Filter-Reaktor-System in Einzelraumfeuerungsanlagen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Typen von Strukturen, deterministische und nicht-deterministische Strukturen, bezüglich des Einsatzes in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen nach dem aerodynamischen und Beladungsverhalten sowie nach der Filtrations- und Oxidationsleistung für staub- und gasförmige Schadstoffemissionen bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Architektur der Struktur einen wesentlichen Einfluss auf die Schadstoffminderungen sowie die Effizienzerhöhung hat. Deterministische Strukturen agieren bei ausreichend hohen Temperaturen sowohl als Filter, als auch als Reaktor und lassen sich sicher, ohne technische Komplikationen im Praxisbetrieb in Einzelraumfeuerungsanlagen einsetzen. Nicht-deterministische Systeme funktionieren mehr als Filter (integrierter Staubabscheider) als Reaktoren. Aufgrund einer schnellen Entwicklung des Druckverlustes beim Auftreten ungünstiger Betriebszustände, sollten die nicht-

deterministischen Strukturen in Einzelraumfeuerungsanlagen nicht eingesetzt werden, da sowohl eine Umweltbelastung als auch eine Gefährdung der Nutzer auftreten kann.

Die Untersuchungen dieses Projektes wurden unter reproduzierbaren, definierten Bedingungen durchgeführt. Da beim Betrieb von Einzelraumfeuerungsanlagen ganz andere Betriebs- und Rahmenbedingungen (Temperatur, Schadstoffbelastung, Abgasvolumenstrom usw.) herrschen, sollten die erhaltenen Erkenntnissen und Ergebnisse in einer realen Forschungsfeuerstätte bei der Verbrennung unterschiedlicher Hölzer validiert werden. Diese Forschungsfeuerstätte soll die genaue Einstellung sowie Messungen der wichtigsten Verbrennungsparameter (Verbrennungsluft- und Abgaswerte) ermöglichen und so flexibel eingebaut werden, dass die Verbrennungsluft (Primär-, Sekundär- und Tertiärluft) auf unterschiedliche Weise, wie z. B. durch die Türscheibe als Scheibenspülluft, durch den Verbrennungsrost, durch die Wände der Feuerstätten kalt oder vorgewärmt und geregelt zugeführt werden. Die Entwicklung dieser Forschungsfeuerstätte mit den dazugehörigen Validierungsuntersuchungen kann im Rahmen weiterer Forschungsprojekte mit der Teilnahme interessierter Industriepartner erfolgen.

## Literaturverzeichnis

- 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.
- Eickhoff, W.: Emissions-Simulationsanlage in Kassel; WLB, Luft und Boden 11 - 12/1990, S. 62-64 2 Schriftenreihe der HLFU, Heft 176, Wiesbaden, 1994.
- Eickhoff, W.; Huckfeldt, U.; Kaletta, G.: Meßtechnische Qualitätssicherung durch Ringversuche zur Bestimmung von Staub und Staubinhaltsstoffen. WLB, Luft und Boden 4/1995, S. 56-587.
- Hartmann, I., Lenz, V., Schenker, M., Thiel, Ch., Kraus, M., Matthes, M., Roland, U., Bindig, R., Einicke, W-D.: Katalytisch unterstützte Minderung von Emissionen aus Biomasse-Kleinf Feuerungsanlagen, DBFZ Report Nr. 6 (2011), 178 S.
- HLfU-Bericht über die Durchführung von Vergleichsmessungen mit Landesanstalten und -ämtern an der Emissionssimulationsanlage, Bericht Nr.: VI/2-0013.
- Jungermann, M.: Ermittlung der Gesamtunsicherheit von Messungen partikelförmiger Schadstoffe an der Emissionssimulationsanlage (ESA) durch Validierung der Verfahren zur Übertragung auf qualitätssichernde Ringversuche, Diplomarbeit, Fachhochschule Gießen-Friedberg, Mai 1996.
- 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.
- Klippel, N.; Nussbaumer, Th.: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub in Vergleich zu Dieselruß, 9. Holzsymposium, Zürich 2006, S. 21-40.
- 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.
- Platt, J.: Validierung von Emissionsmessungen gasförmiger Schadstoffe an der Emissionssimulationsanlage zur Ermittlung der Gesamtunsicherheit und zur Übertragung auf Ringversuche für Messstellen nach § 26, 28 BImSchG, Diplomarbeit an der Fachhochschule Gießen-Friedberg, Juli 2000.

- Schultes, M.: Abgasreinigung, Verfahrensprinzipien, Berechnungsgrundlagen, Vergleich, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, 243S.
- Zenker, P.: Untersuchungen zur Frage der nichtgeschwindigkeitsgleichen Teilstromentnahme bei der Staubgehaltsbestimmung in strömenden Gasen. Staub-Reinhaltung der Luft 31 (1971) Nr. 6, S. 252/56.
- 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, Beuth Verlag GmbH.