

# Ascheverhalten in Wandstromfiltern

In Wandstromfiltern sammelt sich mit zunehmender Laufzeit Asche, die den Gegendruck des Abgassystems langfristig erhöht. Abhängig von den Betriebsbedingungen lagert sie sich auf verschiedene Arten mit unterschiedlichen Auswirkungen ein. Im Rahmen des FVV-Vorhabens „Ascheverhalten in Wandstromfiltern“ (FVV-Nr. 1292) wurde an der TU Braunschweig und der Bergischen Universität Wuppertal experimentell und simulativ untersucht, welche Parameter auf die Art der Ascheablagerung Einfluss haben.

## AUTOREN



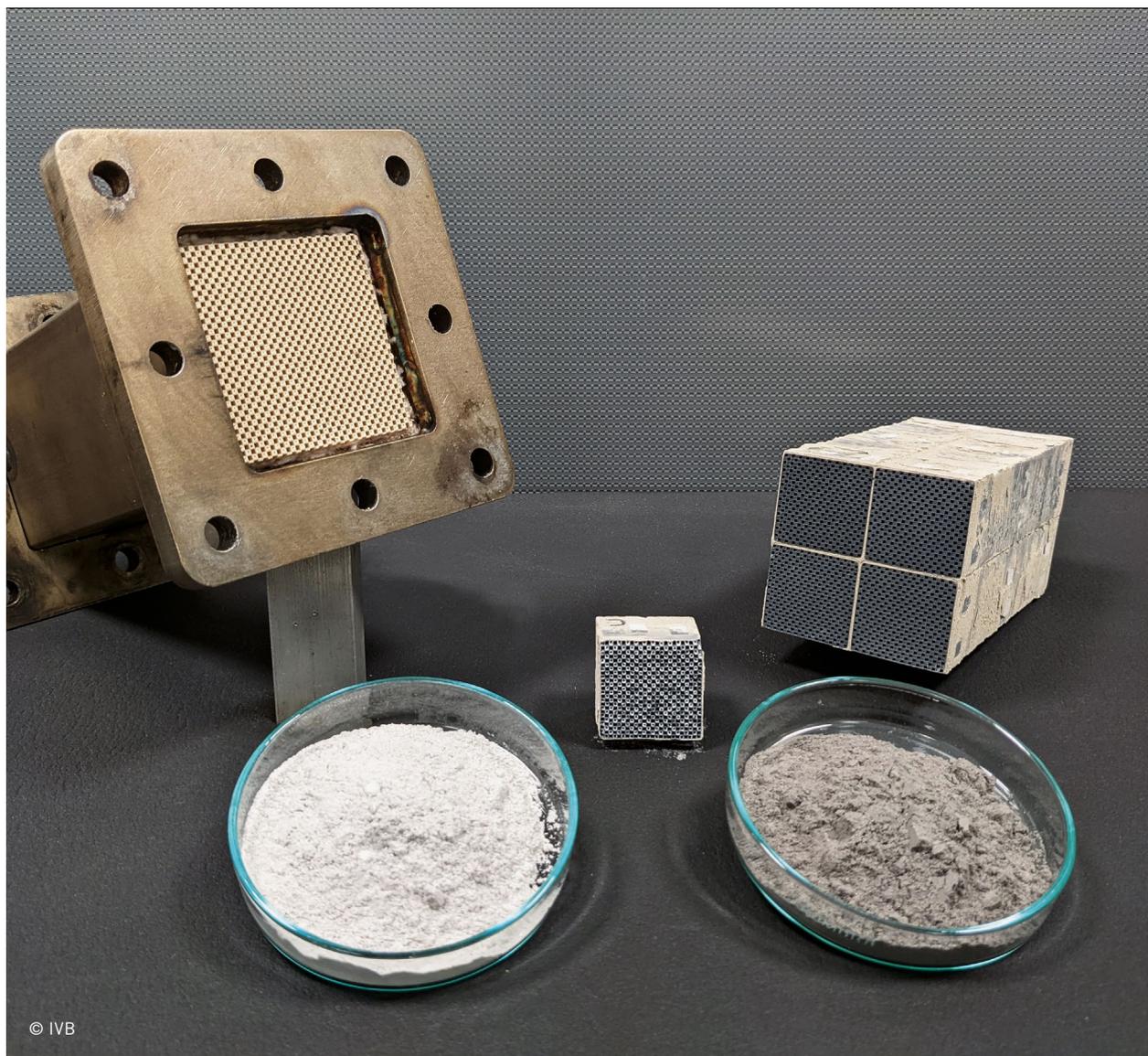
**Lukas Schneider, M. Sc.**  
war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen (IVB) der TU Braunschweig.



**Dr.-Ing. Kamil Braschke**  
ist Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl Strömungsmechanik (LSM) der Bergischen Universität Wuppertal.



**Dr.-Ing. Matthias Kaul**  
ist Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Partikeltechnologie (IPT) der Bergischen Universität Wuppertal.



© IVB

1	MOTIVATION
2	VERSUCHSAUFBAUTEN
3	EINLAGERUNGSVERHALTEN
4	REGENERATIONSVERHALTEN
5	NUMERISCHE SIMULATIONSERGEBNISSE
6	ZUSAMMENFASSUNG

## 1 MOTIVATION

Während in Dieselpartikelfiltern (DPF) abgeschiedener Ruß durch thermische oder kontinuierliche Regeneration wieder aus dem Filter entfernt werden kann, verbleiben Aschepartikel als anorganischer Rest im Filter und erhöhen den Gegendruck [1, 2]. Es gibt zwei theoretische Grenzfälle für die Ascheablagerung: Die Asche kann sich entlang der Kanalwände ablagern oder einen Stopfen am Ende des Kanals bilden [3]. Die Einflussparameter für die Ablagerungsmuster wirken in einem komplexen Gefüge zusammen, das Kosten für Experimente zur Vorhersage in die Höhe treibt. Die am Institut für Verbrennungskraftmaschinen (IVB) der TU Braunschweig sowie am Lehrstuhl Strömungsmechanik (LSM) und am Institut für Partikeltechnologie (IPT) der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführten Untersuchungen [4] tragen zu einem grundlegenden Verständnis der Aschevorgänge im Filter bei. Diese Erkenntnisse, die in Simulationen übertragen werden konnten, reduzieren den Entwicklungsaufwand von DPF.

## 2 VERSUCHSAUFBAUTEN

Die experimentellen Untersuchungen wurden am IPT und am IVB durchgeführt. Das IPT nutzte dazu einen modifizierten Windkanal

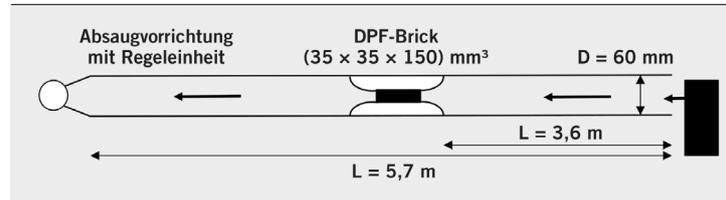


BILD 1 Schematische Darstellung des Windkanals am IPT (© IPT)

zur Be- und Entladung von Filterproben mit einem Aschesubstitut, **BILD 1**. Die Versuche am IVB wurden unter realen Betriebsbedingungen durchgeführt und erfolgten über ein Schnellveraschungssystem, bei dem der Ruß- und Ascheeintrag in das Motorabgas durch die Beimischung von Abgas aus einem Dieselmotor mit Ölspritzung erhöht werden kann. Um die Informationsdichte innerhalb jedes Beladungslaufs zu erhöhen, wurde das Schnellveraschungssystem mit mehreren Abgasleitungen ausgestattet. Das sogenannte Mehrfachveraschungssystem ermöglicht die gleichzeitige Beladung von mehreren Filtern unter definierten Bedingungen, **BILD 2**.

## 3 EINLAGERUNGSVERHALTEN

Für die Untersuchung des Einlagerungsverhaltens von Aschen in Filterbricks wurde durch einen Abgleich zahlreicher physikalischer und chemischer Parameter mit dem Calciumcarbonat Ulmer Weiss XMF ein passendes Aschesubstitut gefunden. Durch Dispergierung im zuvor beschriebenen Windkanal konnten die Filterbricks unter Variation der Versuchsparameter Staubmasse  $m_{\text{staub}}$ , Anströmgeschwindigkeit  $v_{\text{Kanal}}$  und Rohgaskonzentration  $c_{\text{Kanal}}$  beladen wer-

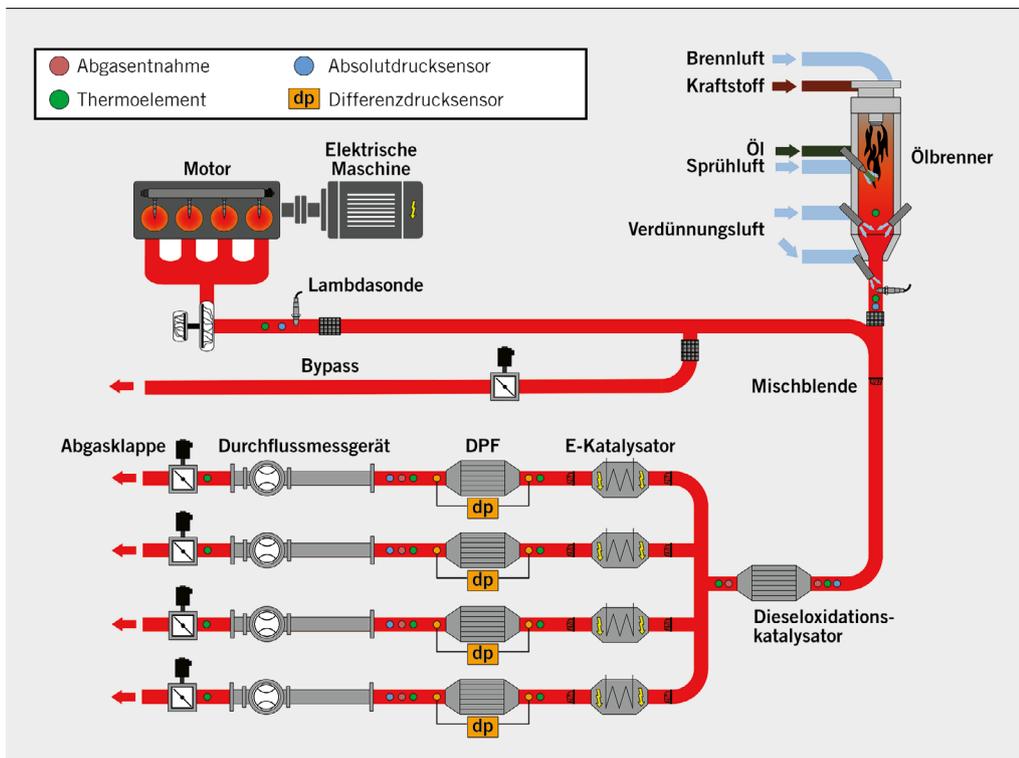


BILD 2 Schematischer Aufbau des Schnell- und Mehrfachveraschungssystems im IVB (© IVB)

Filter-Nr.	$m_{\text{Staub}}$ [g]	$v_{\text{Kanal}}$ [m/s]	$c_{\text{Kanal}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	$l_{\text{Stopfen}}$ [mm]	$\Delta$ Porosität [-]
6	3,6	1	0,5	17,9	0,59
8	7,4	1	0,5	58,6	0,79
7	10,0	1	0,5	89,4	0,83
12	3,4	0,4	0,5	–	–
13	3,7	0,8	0,5	34,3	0,84
14	3,3	1,2	0,5	8,6	0,44
15	2,2	1	0,3	10,7	0,70
16	2,7	1	0,4	13,9	0,72
17	3,1	1	0,6	16,1	0,72
18	3,0	1	1,3	12,6	0,66

TABELLE 1 Versuchsergebnisse am Windkanal mit Variation der Parameter  $m_{\text{Staub}}$ ,  $v_{\text{Kanal}}$  und  $c_{\text{Kanal}}$  (© IPT)

den. Danach wurden alle Filterbricks über 24 h bei 20 °C equilibriert, gewogen und dem Computertomographen zur Messung der Stopfenlänge  $l_{\text{Stopfen}}$  zugeführt. Zur weiteren Evaluierung wurden die Werte für  $l_{\text{Stopfen}}$  mit den gravimetrischen Auswirkungen der Ablagerungen verglichen.

Die Wägung des Filterbricks ergab in allen Fällen eine geringere Massenzunahme als erwartet. Die prozentuale Abweichung zur erwarteten Dichte wurde als zusätzliche Porosität definiert und stellt eine zentrale Kenngröße bei der Beurteilung des Einlagerungsverhaltens dar. Aus TABELLE 1 ist abzuleiten, dass die Variation der Versuchsparameter der einlagerungsfähigen Masse und der mittleren Geschwindigkeit im Windkanal einen Einfluss auf das Einlagerungsverhalten des Testmaterials im Filterbrick hat. Mit steigender Beladung erhöht sich die zusätzliche Porosität. Bei zunehmender Anströmgeschwindigkeit wird die zusätzliche Porosität vermindert. Eine Variation der Konzentration im Rohgas scheint keine Auswirkung auf die Einlagerungen in den Filterbricks zu haben.

#### 4 REGENERATIONSVERHALTEN

Zur realen Beladung der DPF-Substrate wurde mit sonst weitestgehend gleichen Bedingungen insbesondere die Regeneration variiert. Die Basisdaten über der jeweiligen Probe wurden durch eine Kombination verschiedener Motor- und Brennerbetriebspunkte sowie der Klappenstellung des Mehrfachveraschungssystems eingestellt. Die Bewertung der Ablagerungsmuster erfolgte durch das segmentweise Zerbrechen der Substrate mit anschließender Bildauswertung.

Der Einfluss der Regenerationstemperatur  $T_{\text{Reg}}$  wurde zum einen in Hinblick auf den diskontinuierlichen Rußabbrand durch die Reaktion mit  $O_2$  ( $T_{\text{Reg}} = 575/625^\circ\text{C}$ ) und zum anderen durch die Reaktion mit  $NO_2$  ( $T_{\text{Reg}} = 350/450^\circ\text{C}$ ) untersucht. In beiden Fällen lagert sich die Asche in den Filtern hauptsächlich als Aschestopfen ab. Bei annähernd gleicher Aschebeladung werden diese Stopfen mit steigender Regenerationstemperatur niedriger und die Ascheverdichtete im Stopfen steigt. Insbesondere bei sehr niedrigen Regene-

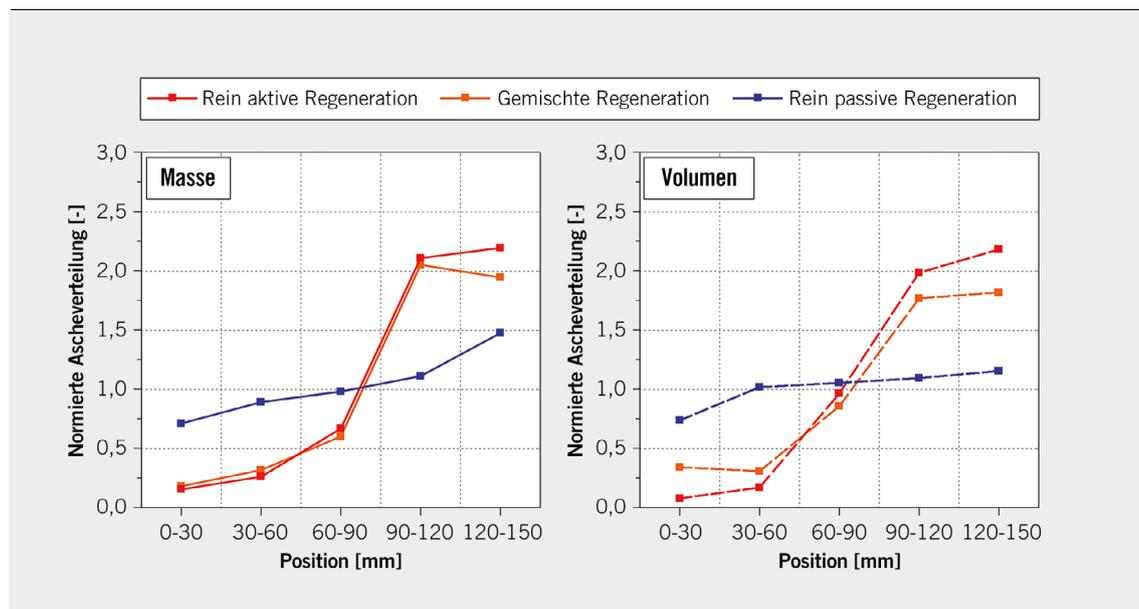
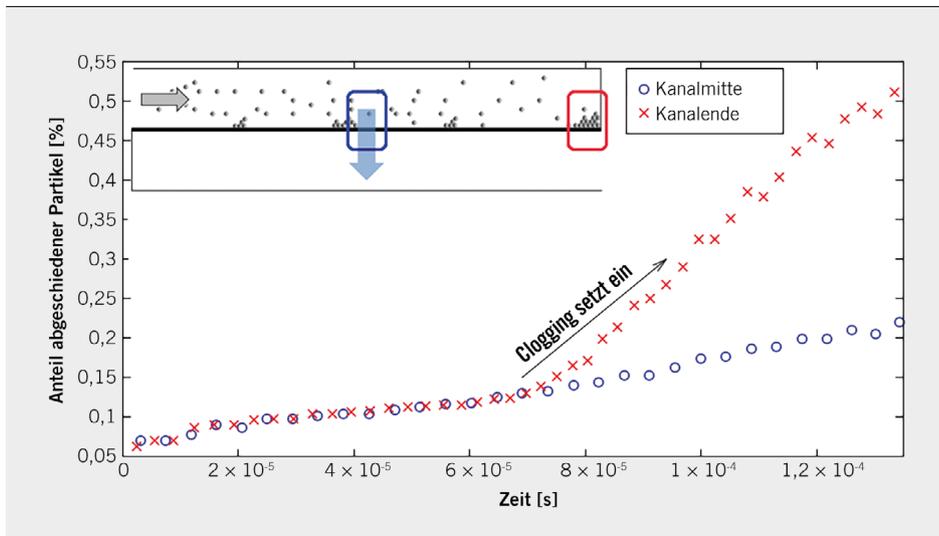


BILD 3 Normierte Ascheverteilung für aktive, hybride und rein passive Regeneration hinsichtlich Masse (links) und Volumen (rechts) (© IVB)



**BILD 4** Prozentual zur Gesamtanzahl abgeschiedene Partikel im simulierten DPF-Kanalstück und Veranschaulichung der betroffenen Ausschnitte im Einlasskanal (© LSM)

rationstemperaturen bildet sich zusätzlich eine ausgeprägte Wandschicht aus. Diese kennzeichnet sich maßgeblich durch eine grobe, ungleichmäßige Struktur. Generell zeigen sich Anzeichen dafür, dass die Aschedichte in der Wandschicht mit steigender Regenerations-temperatur abnimmt. Die Beobachtungen deuten darauf hin, dass bei höherer Temperatur vermehrt Ascheagglomerate aus der Wandschicht als Auflockerung herausgelöst und an das Kanalende mit Wirkung einer Verdichtung transportiert werden.

Zur Untersuchung des Einflusses der Regenerationsart wurde ein Vergleich von kontinuierlicher und diskontinuierlicher Regeneration sowie einer Mischung der beiden durchgeführt. **BILD 3** zeigt die normierte Ascheverteilung für alle drei Filter. Die kontinuierliche Regeneration führt zur Ausbildung einer Wandschicht, die nach hinten dicker wird und in ihrer Packungsdichte zunimmt. Teilweise lässt sich im vorderen Bereich des Filters eine Ablösung der Ascheschicht von der Filterwand beobachten. Die diskontinuierliche Regeneration zeigt die bereits erwähnte Stopfenbildung. Auch bei der Mischregeneration lagert sich die Asche als Stopfen ein. Es fällt jedoch auf, dass sich zusätzlich eine dünne Wandschicht ausbildet und dass die Aschepackungsdichte im Stopfen bei der Mischregeneration bis zu 50 % höher ist als bei der rein aktiven kontinuierlichen Regeneration. Es ist denkbar, dass innerhalb der Wandschicht instabilere Strukturen mit größerer Angriffsfläche vorliegen, die sich durch den teilweise kontinuierlich ablaufenden Rußabbrand bilden. Insgesamt erfolgt die Ausbildung eines Aschestopfens immer nur durch eine diskontinuierliche Regeneration.

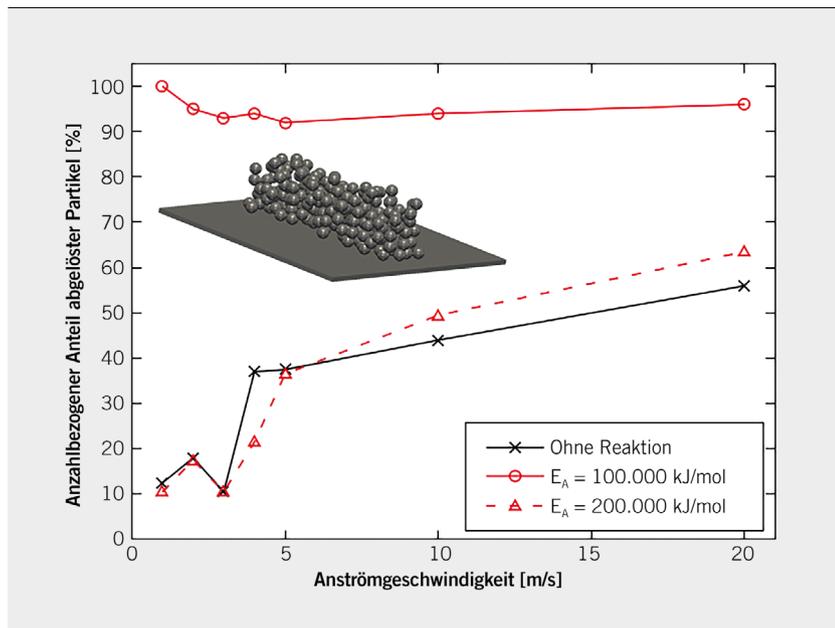
Die Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeit wurde sowohl für eine kontinuierliche als auch diskontinuierliche Regeneration durchgeführt. Auch eine Vervielfachung der Strömungsgeschwindigkeit bei kontinuierlicher Regeneration führt nicht zu einer Stopfenbildung im Kanal. Stattdessen bildet sich eine dichte Wandschicht aus, die sich mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit immer mehr der Kanalform anpasst. Bei diskontinuierlicher Regeneration führt eine Verdoppelung der Strömungsgeschwindigkeit zu 30 % dichteren Aschestopfen. Zusätzlich bildet sich eine weitere Wandschicht entlang des Kanals aus. Aufgrund der im System verwendeten elektrischen Heizelemente wird die Regenerationstemperatur langsamer erreicht, was zu einem langsameren Rußabbrand führt, der vermutlich die Ablösung von Wandasche erschwert.

## 5 NUMERISCHE SIMULATIONSERGEBNISSE

Begleitet wurden die experimentellen Untersuchungen von numerischen Simulationen zum Abbrand von Ruß und dem Migrationsverhalten von Asche. Die Rechnungen wurden mithilfe des Open-Source-Softwarepakets OpenFoam durchgeführt, das um eine eigens entwickelte Immersed Boundary Methode (IBM) zur Abbildung der dispersen Phase erweitert wurde. Eine IBM zeichnet sich dadurch aus, dass der Einfluss der im Fluid befindlichen Objekte auf die Strömung nicht für jede mögliche Geometrie modelliert werden muss, sondern direkt aus der Einbindung allgemeingültiger Quellterme folgt. Des Weiteren können Strömungskräfte, aus denen beispielsweise Partikeltrajektorien folgen, direkt aus dem Rechengitter des Fluids auf die Oberfläche des Objekts lokal aufgelöst interpoliert werden. Daraus ergibt sich eine weitere Modell-unabhängigkeit. Ergänzt wurde die Formunabhängigkeit um allgemeine Adhäsions-, Kollisions- und Agglomerationsmethoden. So ist ein Gesamtpaket entstanden, mit dem sowohl das Anhaften als auch das Ablösen beliebig geformter Partikelgeometrien in einem DPF numerisch beschrieben werden können.

Zunächst wurde der Unterschied im Abscheideverhalten von Partikeln in der Mitte und am Ende eines DPF-Einlasskanals berechnet. Die Mitte zeichnet sich so aus: Entweder verlassen die Partikel das Rechengitter über Auslässe in der Bewandung, oder sie folgen dem Kanalabschnitt, was einem Weitertransport in der dispersen Phase entspricht. Die Simulationsberechnungen des Kanalendstücks zeigen, dass der Transport hier nicht möglich ist und die Partikel an der verstopften Kanalwand abgeschieden werden. Die Ergebnisse der Berechnungen zu beiden Positionen im DPF sind in **BILD 4** dargestellt. Die Ausbildung eines Stopfens am Kanalende ist deutlich zu erkennen.

Zur Untersuchung des Weitertransports von Partikeln mit und ohne Abbrand wurden numerische Simulationen an einer überströmten Partikelschüttung durchgeführt, die sich an den Daten der experimentellen Untersuchungen orientiert haben. Die Ergebnisse in **BILD 5** verdeutlichen den Unterschied in abgelöster Partikelanzahl mit und ohne Reaktion. Insbesondere ist zu erkennen, dass ein Großteil der Ablösung ohne Reaktion bei einer Anström-geschwindigkeit von 5 m/s beginnt. Dies entspricht ungefähr der



**BILD 5** Einfluss der Reaktivität  $E_A$  auf das Ablöseverhalten und Darstellung des Substrats mit der Rußschicht bestehend aus 200 volumetrisch aufgelösten Partikeln (© LSM)

lokalen Geschwindigkeit in Wandnähe bei Messungen mit einer Oberflächengeschwindigkeit von 20 m/s.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Das Verhalten von Asche in Wandstromfiltern wurde in Abhängigkeit unterschiedlicher Betriebsparameter untersucht. Am IPT konnte dabei mit Ulmer Weiß XMF ein Aschesubstitut gefunden werden, das gut verfügbar und gesundheitlich unbedenklich ist sowie wesentliche Eigenschaften echter Aschen aufweist. Zudem wurde ein Windkanal zur Beladung von Partikelfilterbricks modifiziert. Bei den Versuchen am Windkanal konnten insbesondere die Einflüsse von Strömungsgeschwindigkeit, Beladungsmasse und Aschekonzentration im Rohgas bestimmt werden. Bei den Untersuchungen am IVB wurde ein Schnell- und Mehrfachveraschungssystem entwickelt und aufgebaut. Durch den Einsatz des Systems war es möglich, eine große Anzahl von Probensubstraten unter realistischen Bedingungen in sehr kurzen Versuchszeiten mit motorischer Asche zu beladen und anschließend zu analysieren. Dabei wurden insbesondere die Parameter Regenerationstemperatur, Regenerationsart und Strömungsgeschwindigkeit betrachtet und deren Einfluss auf die Aschemobilität bestimmt.

Im simulativen Teil des Vorhabens wurden am LSM mehrere einzelne Modelle zur Beschreibung der Interaktion volumetrisch aufgelöster Partikel und zu deren Oxidation entwickelt. Das neuartige Modell zur Beschreibung von Partikelkollisionen ermöglicht die Bestimmung von Kollisionskräften beliebiger Objektgeometrien und ist inhärent energieerhaltend. Die Modellierung des Agglomerationsvorgangs erfolgt ähnlich über Erhaltungssätze wie die Kollisionsauflösung, jedoch sind hier Impuls und Drehimpuls die definierenden Größen und bleiben somit inhärent erhalten. Zur Berechnung der Adhäsionskräfte wurde in diesem Projekt erstmalig eine Methode entwickelt, die rein auf einer Zerlegung der 3-D-Geometrien (im STL-Format) in Segmente von Halbräumen basiert, wodurch der zeitliche Anspruch an die Rechnung immens abnimmt. Abschließende Simulationen haben gezeigt, dass die entwickelten

Modelle imstande sind, das Transportverhalten von Materie in einem durchströmten DPF-Kanal abzubilden.

## LITERATURHINWEISE

- [1] Sappok, A.; Wong, V. W.: Lubricant-Derived Ash Properties and Their Effects on Diesel Particulate Filter Pressure-Drop Performance. In: Journal of Engineering for Gas Turbines Power 133 (2011), Nr. 3, S. 032805.1-032805.12
- [2] Sappok, A.; Wong, V. W.: Ash Effects on Diesel Particulate Filter Pressure Drop Sensitivity to Soot and Implications for Regeneration Frequency and DPF Control. In: SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 3 (2010), Nr. 1, S. 380-396
- [3] Dittler, A.: Ash Transport in Diesel Particle Filters. SAE Technical Paper 2012-01-1732, 2012
- [4] Schneider, L.; Braschke, K.; Kaul, M.: Untersuchung der Ascheeinlagerung und -migration in Wandstromfiltern. FVV-Projekt Nr. 1292, Abschlussbericht Nr. 1264, Frankfurt am Main, 2021

## DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projekt-Nr. 1292) wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen (IVB) der TU Braunschweig unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, dem Institut für Partikeltechnologie (IPT) der Bergischen Universität Wuppertal unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt und dem Lehrstuhl Strömungsmechanik (LSM) der Bergischen Universität Wuppertal unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. (IGF-Förder-Nr. 19782 N) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestags finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr. Bernhard Lüers (FEV Europe GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: [www.mtz-worldwide.com](http://www.mtz-worldwide.com)