

INDUSTRIELÖSUNGEN

# ABGASREINIGUNG



1	Einleitung
2	Nachbehandlung von motorischen Abgasen
4	Industrielle Abgasreinigung
6	Anwendungen in Innenräumen und im häuslichen Bereich
8	Sensorik
9	Material- und Prozessanalyse
10	Ausstattung
12	Kompetenzen
13	Kooperationsmodelle

**TITELBILD** *Das Fraunhofer IKTS entwickelt keramische Filter, Adsorbentien, Katalysatoren und Katalysatorträger, die dazu beitragen, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickstoffoxide und Partikel aus Abgasen zu entfernen.*

**1** *Beheizte Schaumkeramik im Heißgasprüfstand.*

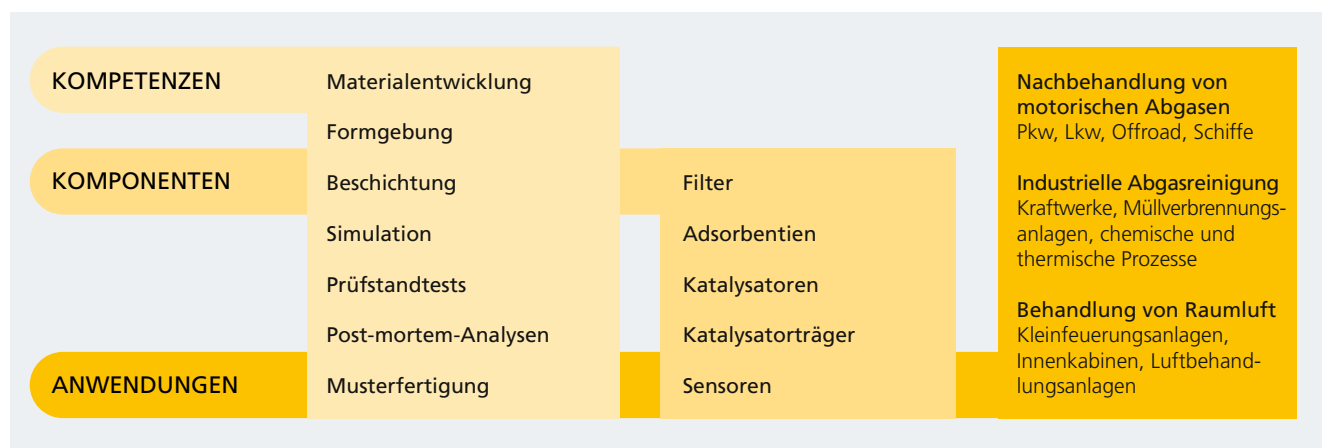


# KERAMIK IN DER ABGASREINIGUNG

Abgase aus verschiedenen technischen Prozessen verunreinigen unsere Umgebungsluft und können zu Umwelt- und Gesundheitsschäden führen. Für die Reinigung und die Einhaltung von Emissions- und Immissionsgrenzwerten gibt es – je nach Verursachungsprozess und Verunreinigung – sehr unterschiedliche Verfahren. Keramische Filter, Adsorbentien, Katalysatoren und Katalysatorträger ermöglichen in vielen dieser Reinigungsverfahren effiziente und kostengünstige Ergebnisse, vor allem, wenn es um hohe Temperaturen, chemische Korrosion und Langlebigkeit geht.

Insbesondere bei der Reinigung von Abgasen aus Verbrennungskraftmaschinen wie Otto- oder Dieselmotoren sind keramische Katalysatorträger und Dieselpartikelfilter unverzichtbar geworden. Inzwischen werden allein in westeuropäischen Pkws jährlich ca. 20 Mio. keramische Katalysatorträger und Partikelfilter verbaut. Darüber hinaus spielen keramische Komponenten auch in der Abgasreinigung von großen Industrieprozessen, wie in Kraftwerken, Müllverbrennungsanlagen und Anlagen der chemischen und thermischen Prozesstechnik, eine wichtige Rolle. Selbst in Haushaltsanwendungen haben keramische Filter und Katalysatoren Einzug gehalten.

Mit seiner langjährigen Entwicklungskompetenz in diesem Bereich trägt das Fraunhofer IKTS dazu bei, Werkstoffe und Fertigungsverfahren zu optimieren sowie neue Anwendungen zu erschließen. Außerdem bietet das Institut anspruchsvolle und teilweise neu entwickelte Analyse-, Modellierungs- und Simulationstechniken zur Material-, Bauteil- und Prozessoptimierung an. Die Untersuchung keramischer Komponenten nach Einsatzerprobung gehört ebenfalls zum Leistungsangebot. Zudem besitzt das IKTS umfangreiches Know-how in der Entwicklung von keramischen Gassensoren und komplexen Sensorsystemen für den Einsatz in der Abgasreinigung.





1



2

## NACHBEHANDLUNG VON MOTORISCHEN ABGASEN

Motorische Abgase von Pkws, Lkws, Offroad-Fahrzeugen, stationären Anlagen oder Schiffen gehören zu den Hauptquellen der Emission von Luftschadstoffen. Die Einhaltung von Schadstoffgrenzwerten für die Emission von Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (HC), Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) und Partikeln (PM, PN) ist daher ein zentrales Thema bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren. Aufgrund von verschärften Abgasvorschriften und verbesserten Abgasnachbehandlungstechnologien hat die Belastung der Luft mit Schadstoffen in den letzten Jahren zwar deutlich abgenommen, jedoch kommt es beispielsweise in Ballungsräumen immer wieder zu Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte von Stickstoffdioxid und Feinstaub.

### PARTIKELFILTRATION

Feinstaubpartikel aus der motorischen Verbrennung sind krebserregend und damit besonders kritisch für Mensch und Umwelt. Mit Partikelfiltern kann der Feinstaub von motorischen Abgasen sicher und effektiv reduziert werden. Dieses Prinzip findet bei Dieselpartikelfiltern bereits eine breite Anwendung und ist in Form von Ottopartikelfiltern (OPF oder GPF) auch bei modernen Benzinmotoren mit Direkteinspritzung eingeführt. Dabei werden an die Filter folgende grundlegende Anforderungen gestellt:

- Hohe Filtrationswirkung zur effizienten Abscheidung von Feinstpartikeln aus dem Abgas
- Geringer Gegendruck im unbeladenen Zustand und bei der Partikelbelastung im Filterbetrieb
- Sehr gute thermische Beständigkeit zur Bewältigung der bei der Regeneration auftretenden hohen Temperaturen und Temperaturgradienten

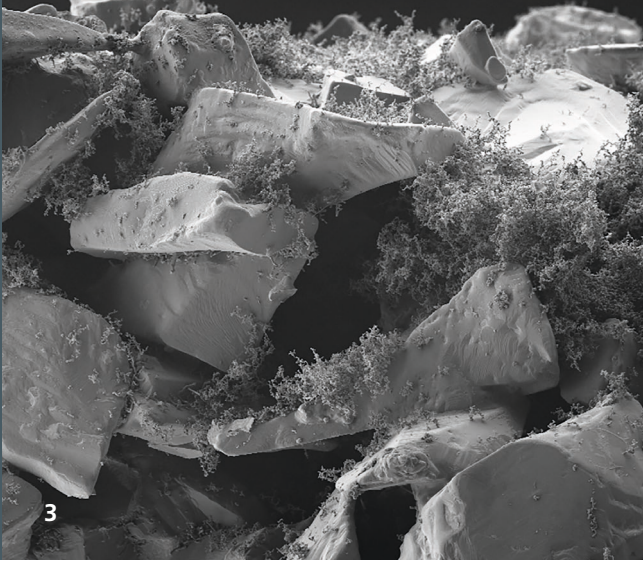
Keramische Wall-flow-Filter zur Rußpartikelfiltration haben in den zurückliegenden Jahren bereits einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Die fortschreitende Verschärfung der Emissionsgrenzwerte und die Forderung nach energieeffizienteren Fahrzeugen machen aber auch zukünftig Weiterentwicklungen notwendig, die insbesondere auf Verringerungen des Gegendrucks und Verbesserungen der Abscheideleistung von Partikelfiltern sowie der Kombination von Partikelfiltration und Katalyse ausgerichtet sind.

Das Fraunhofer IKTS beschäftigt sich bereits seit 20 Jahren mit der Entwicklung und Analyse von Partikelfiltern. Im Fokus stehen sowohl die Materialentwicklung für Substrate aus verschiedenen Werkstoffen wie SiC (RSiC, LPS-SiC und oxidisch gebundenes SiC) oder Cordierit als auch das Design der Partikelfilter und deren umfangreiche Charakterisierung. Das IKTS bildet dafür die gesamte Prozesskette von der Werkstoffauswahl über die Masseaufbereitung und Formgebung (z. B. Extrusion) bis zur Wärmebehandlung ab. Dabei kommen verschiedene Charakterisierungs- und Prüfverfahren für die einzelnen technologischen Schritte zum Einsatz. Dazu zählen beispielsweise Viskositäts-, Toleranz- oder Schwindungsuntersuchungen sowie die Kontrolle des thermischen Abbaus von keramischen Hilfsmitteln mittels TG/DTG.

Ein weiteres großes Arbeitsgebiet des IKTS ist die Charakterisierung von Partikelfiltern im Neu- und Post-mortem-Zustand hinsichtlich Gegendruck, Abscheideleistung, Ascheeinlagerung, Festigkeiten, thermophysikalischer Eigenschaften, chemischer Zusammensetzung und mikro- und makroskopischer Eigenschaften.

1 Motorische Abgase (Quelle: [ssuaphotos/shutterstock.com](https://www.shutterstock.com)).

2 Großformatiger SiC-Partikelfilter für Lkws und Off-Road-Fahrzeuge.



## KATALYSE

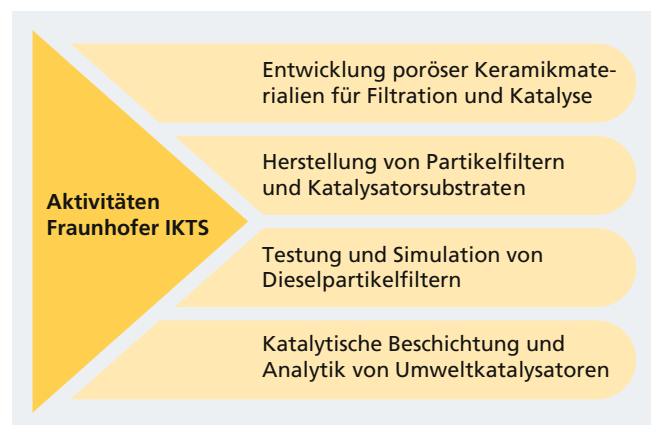
Katalysatoren werden in motorischen Anwendungen zur Reduzierung der Emissionen von Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffen und Stickstoffoxiden eingesetzt, da diese Schadstoffe eine reizende Wirkung haben und giftig sind. Die Prüfung und Entwicklung von Katalysatoren für die Abgasnachbehandlung bilden einen Arbeitsschwerpunkt des Fraunhofer IKTS. Dieser umfasst sowohl die Untersuchung der Eigenschaften und des Einsatzverhaltens konventioneller Katalysatoren als auch die Realisierung neuer Katalysatorlösungen. Dazu zählen sowohl Dieseloxydations- und DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren als auch funktionalisierte Partikelfilter.

Der Fokus der Entwicklungsarbeiten liegt auf unterschiedlichen Katalysatorsubstraten wie hochporösen Waben- und Filtersegmenten oder offenzelligen Schaumkeramiken. Der Vergleich der verschiedenen Katalysatorstrukturen zielt auf die Bewertung anwendungsrelevanter Eigenschaften wie der Reaktivität und des Gegendrucks, die durch das unterschiedliche Durchströmungsverhalten beeinflusst werden. Darüber hinaus wird an optimalen und innovativen Beschichtungstechnologien gearbeitet.

Für die Untersuchung und Optimierung von Katalysatoren und katalytisch beschichteten Partikelfiltern stehen am IKTS zwei Synthesegasprüfstände mit moderner Analysetechnik zur Verfügung. Damit können in stationären oder dynamischen Prüfzyklen Light-off-Temperaturen und Konvertierungsraten für Oxidations- und SCR-Katalysatoren ermittelt werden. Zudem lässt sich mittels transientscher Umschaltung zwischen fetten und mageren Gaszusammensetzungen das Umsatzverhalten von Dreiwege- und NO<sub>x</sub>-Speicher-katalysatoren bestimmen. Diese Analysen erfolgen in Abhängigkeit von der Temperatur (bis 900 °C mit Heizraten bis 30 K/s), der Abgaszusammensetzung (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>, HC, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>) und dem Volumenstrom (bis 200 l/min). Zur Erreichung repräsentativer und

aussagekräftiger Ergebnisse werden speziell gefertigte Prüfungsgeometrien (Katalysatorsegmente oder Bohrkernproben) verwendet und das Probenvolumen auf anwendungsrelevante Durchströmungsbedingungen angepasst.

Neben diesen Reaktivitätsuntersuchungen stehen auch spezielle Methoden zur Charakterisierung der Materialeigenschaften zur Verfügung. Durch die Analyse alterungsbedingter Veränderungen der Katalysatorzusammensetzung, der Washcoatstruktur, der spezifischen Oberfläche sowie der mechanischen und thermomechanischen Eigenschaften können Deaktivierungsmechanismen besser verstanden werden.



**3** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines ruß-beladenen Partikelfilters.

**4** Prüfstand für Gegendruck und Berührung.



## INDUSTRIELLE ABGASREINIGUNG

Die Reinigung heißer Abgase kann je nach Anwendungsgebiet und Emissionsart mit verschiedenen Techniken erfolgen. Keramiken kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn herkömmliche Lösungen an Temperaturgrenzen stoßen oder sehr korrosive Medien auftreten. Keramiken können häufig auch kostengünstige Alternativen darstellen, beispielsweise gegenüber teuren Speziallegierungen.

### HEISSGASFILTRATION / ENTSTAUBUNG

Zur Entstaubung von Heißgasen und bei der Rückgewinnung von Wertstoffen aus heißen Abgasen werden rückreinigungsfähige Keramikfilter bis zu einer Betriebstemperatur von ca. 800 °C und darüber eingesetzt. Der Entwicklungsfokus lag lange auf Anwendungen in modernen Kohlekraftwerkskonzepten (druckaufgeladene Kombi-Kraftwerke). Aktuellere Vorhaben konzentrieren sich inzwischen auf Prozesse bei der Biomassevergasung, Abgasreinigung in der Zement- und Glasindustrie, Abfallverbrennung sowie bei der Herstellung von Farbpigmenten oder Metallpulvern.

In diesem Zusammenhang arbeitet das Fraunhofer IKTS an der Verbesserung von Filtermaterialien, an Technologien zur Herstellung von innovativen Filtergeometrien und an neuen Anwendungen für Heißgasfilter. Mit einem Spezialprüfstand kann die Abscheideleistung der Filter und das Abreinigungsverhalten von verschiedenen Stäuben analysiert werden.

### KATALYTISCHE ABGASREINIGUNG

In einer Vielzahl industrieller Prozesse werden Katalysatoren für die Reduzierung von Schadstoffemissionen aus Abgasen eingesetzt. Zu den häufigsten katalytischen Anwendungen in der Abgasreinigung zählen die Oxidation von Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffen und anderen flüchtigen organischen Verbindungen sowie die Reduktion von Stickstoffoxiden. Die Vorteile der katalytischen Abgasnachbehandlung liegen vor allem im niedrigeren Energiebedarf und in den höheren Umsatzraten gegenüber thermischen Methoden. Voraussetzung dafür sind effiziente Katalysatoren, die hinsichtlich ihrer Struktur und Materialzusammensetzung auf die jeweiligen Prozessbedingungen abgestimmt sind.

Strukturierte Katalysatoren bieten hierbei aufgrund ihrer großen geometrischen Oberfläche und ihres guten Durchströmungsverhaltens ein hohes Potenzial für die Anwendung in heterogen katalysierten Gasphasenprozessen. Am Fraunhofer IKTS werden auf Basis hochporöser keramischer Strukturen, wie offenzelligen Schaumkeramiken oder Keramikwaben, optimierte Katalysatoren entwickelt. Durch die Beschichtung der Trägerstrukturen mit ausgewählten katalytisch aktiven Materialien wird eine Funktionalisierung erreicht. Dabei genügt es, dünne Schichten auf den Substratkörper aufzubringen, um vergleichbare katalytische Umsätze wie bei Schüttungen zu erreichen. Entsprechende Lösungen konnten bereits für Oxidations- und DeNOx-Katalysatoren umgesetzt werden.

1 *Industrieanlagen mit Abgasen (Quelle: leungchopan/shutterstock.com).*

2 *Heißgasfiltrationsprüfstand für Wabenfilter oder Filterkerzen.*



## ADSORPTION

Mittels Adsorption lassen sich gasförmig vorliegende Schadstoffe, vor allem in niedrigen Konzentrationen, reinigen. Beladene Adsorptionsmittel werden anschließend entsorgt oder bei der Desorption regeneriert. Werthaltige Stoffe wie Lösungsmittel aus der Abluft von Druckereien können so zurückgewonnen werden.

Typische Adsorbentien sind Aktivkohlen oder Zeolithe, die überwiegend als Festbettschüttungen eingesetzt werden. Mittels keramischer Technologien können Adsorbentien allerdings in speziellere Formen gebracht oder auf Trägern fixiert werden, z. B. als Kugeln, Pellets, Honeycombs oder andere offenzelluläre Strukturen. Damit lassen sich neue Handlings- und Anwendungseigenschaften sowie innovative Regenerationsverfahren wie mikrowellenbasierte Verfahren realisieren. Das Fraunhofer IKTS arbeitet zudem an der Entwicklung neuer oder verbesserter Adsorbentien in Form von modifizierten Aktivkohlen, Tonmineralien, Zeolithen und MOFs (Metal Organic Frameworks).

Durch die Kombination von Adsorbentien mit anderen Werkstoffen lassen sich bestimmte Eigenschaften optimieren. So konnte durch die Ummantelung von zylindrischen Zeolithpellets mit einer metallischen Hülle die Wärmeleitfähigkeit des Festbettes um das Vierfache gesteigert werden, was für die schnelle Aufheizung und Abkühlung bei Beladungs- und Regenerationsprozessen von Vorteil ist.

## GASTRENNUNG

Das IKTS entwickelt Materialien, Komponenten und Verfahren für die Gastrennung bei hohen Temperaturen. Dabei stehen gegenüber den klassischen Verfahren die Einsparung von Energie und die Integration in industrielle Prozesse im Fokus (z. B. CO<sub>2</sub>-Abtrennung, CCS). Bei der Entwicklung neuer Kraftwerkskonzepte mit verringerter Schadstoffemission und höherem Wirkungsgrad treten gastrennende Membranen immer mehr in den Blickpunkt des Interesses. Der Vorteil von Membranen im Vergleich zu zyklischen Prozessen wie Adsorption und Desorption beruht auf dem kontinuierlichen Betrieb, einer einfachen und flexiblen Anlagenkonzeption mit niedrigen Investitionskosten und einem geringem Energiebedarf.

Basis der Werkstoffentwicklung am IKTS sind Graphit-, Carbon-Nanotube- und polymerabgeleitete keramische Membranen basierend auf Siliziumoxycarbid (SiOC), Siliziumcarbonitrid (SiCN) sowie Siliziumcarbid (SiC). Durch die gezielte Optimierung der Syntheserouten können dünne Membranen mit molekularen Eigenschaften hergestellt werden. Dabei lassen sich die Trenneigenschaften in weiten Grenzen durch die Variation des Membranmaterials anpassen. Sie zeigen so ein unterschiedliches Potenzial zur Trennung von Gasen unterschiedlicher Molekülgröße (z. B. H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>), aber auch zur Separation von Gasen ähnlicher Molekülgrößen durch Adsorption (z. B. CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Biogas).

**3** Offenzellige, katalytisch beschichtete, großformatige Schaumkeramikbauteile.

**4** Vollkeramische Pellets und metallummantelte keramische Pellets mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit.



## INNENRÄUME UND HÄUSLICHER BEREICH

Der Mensch verbringt einen Großteil seiner Lebenszeit in Innenräumen – ob zu Hause, unterwegs oder auf Arbeit. Die Qualität der Raumluft spielt daher eine wichtige Rolle. Staub, Bakterien oder Gerüche beeinträchtigen diese aber entscheidend. Schaumkeramikfilter zu Entstaubung oder keramisch geträgerte Photokatalysatoren zur Geruchsfiltration können zu einer gesunden Innenraumhygiene und einem angenehmen Raumklima beitragen.

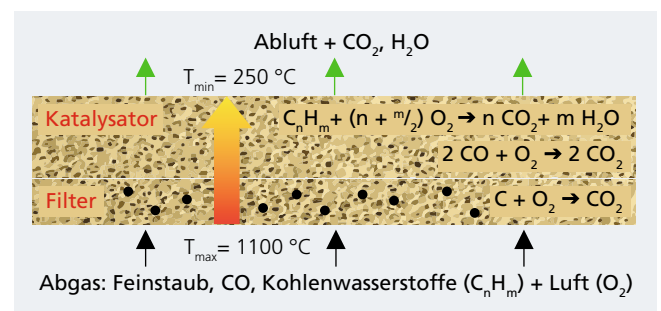
## HEIZUNG

Feuerstätten und Kleinf Feuerungsanlagen, die mit Holz oder Holzpellets bzw. mit anderen nachwachsenden Rohstoffen betrieben werden, bilden interessante Alternativen zu Heizungen mit konventionellen Energieträgern wie Öl und Gas. Seit dem 1. Januar 2015 gilt in Deutschland die 2. Stufe der 1. BImSchV, in der die zulässigen Emissionen von Einzelraumfeuerungsanlagen (Kamin- und Kachelöfen) auf 40 mg/m<sup>3</sup> Staub und 1250 mg/m<sup>3</sup> Kohlenstoffmonoxid begrenzt sind.

Durch den Einsatz von Schaumkeramikfiltern können Feinstaubemissionen von Kaminöfen deutlich reduziert werden. Die netzartige, hochporöse Keramikstruktur nimmt Partikel und Schadstoffe in ihrem Inneren auf, ohne dabei zu verstopfen. Das funktioniert vor allem im Anfeuerungszyklus, wenn hohe Ruß- und Kohlenwasserstoffemissionen auftreten. Bei Erreichen einer höheren Temperatur werden diese Schadstoffe

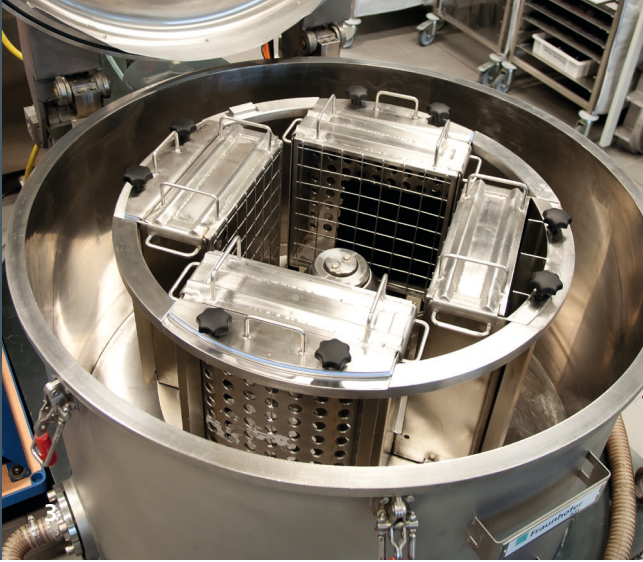
im Filter sauber verbrannt. Der Einbau eines Filters aus Schaumkeramik direkt im Ofen oberhalb der Feuerung gewährleistet einen selbständigen Reinigungseffekt ohne Eingriffe des Betreibers und ohne aufwändige technische Zusatzinstallationen. Gleichzeitig verläuft die Verbrennung wesentlich effizienter, so dass eine Einsparung an Brennstoff erreicht wird.

Eine darüber hinausgehende, zusätzliche Reduktion von gasförmigen Schadstoffen wie Kohlenwasserstoffen (HC) und Kohlenstoffmonoxid (CO) kann durch den Einsatz von Katalysatoren erreicht werden (siehe Grafik). Dabei müssen diese gut auf die Betriebsbedingungen in der Feuerstätte abgestimmt werden, um optimale Ergebnisse bei der Schadstoffreduzierung zu erhalten. Von besonderer Bedeutung für die Katalysatoraktivität und die Alterungsbeständigkeit sind die Temperaturbedingungen, die im Feuerstättenbetrieb auftreten.



- 1 Kamin als Holzfeuerstätte (Quelle: XXLPhoto/shutterstock.com).
- 2 Stereomikroskopische Aufnahme eines beaschten Schaumkeramikfilters.





## GERUCHSFILTRATION

Bei zahlreichen industriellen Prozessen und im Haushaltsbereich kann es zu Emissionen durch gasförmige Geruchsstoffe kommen, die ab einer bestimmten, aber meist sehr niedrigen Konzentration in der Raum- und Umgebungsluft als unangenehm empfunden werden. Für eine effektive Geruchsreduktion sowie sichere Entfernung und Bindung einer Vielzahl von Verunreinigungen werden häufig Adsorbentien wie Aktivkohle in Schüttungen oder Geweben verwendet. Mittels keramischer Technologien können diese auch in zelluläre Formteile überführt oder auf entsprechende Keramiksubstrate aufgebracht werden. Dies vereinfacht das Handling und verbessert bestimmte Anwendungseigenschaften wie das Gegendruck- oder Regenerationsverhalten bei hohen Temperaturen. Neben Aktivkohlen entwickelt und verarbeitet das IKTS auch keramikähnliche Adsorbentien wie Zeolithe oder metallorganische Gerüstverbindungen (MOFs), die in bestimmten Anwendungen leistungsfähiger oder regenerationsstabiler sind.

Eine Alternative zu Adsorbentien stellen sogenannte Photokatalysatoren dar, an deren Oberfläche sich unter Einstrahlung von natürlichem oder künstlichem UV-Licht Radikale bilden, die organische Substanzen zersetzen und gasförmige Stoffe oxidieren. Das Fraunhofer IKTS verfügt über geeignete Technologien, um Photokatalysatoren auf  $\text{TiO}_2$ -Basis als Schichten auf zellulären Strukturen wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -, Cordierit- oder SiC-Schaumkeramiken oder auf flächigen keramischen Elementen aufzubringen. Dabei ist es für den Luftreinigungsprozess vorteilhaft, dass neben einem geringen Gegendruck auch eine hohe Wirk-

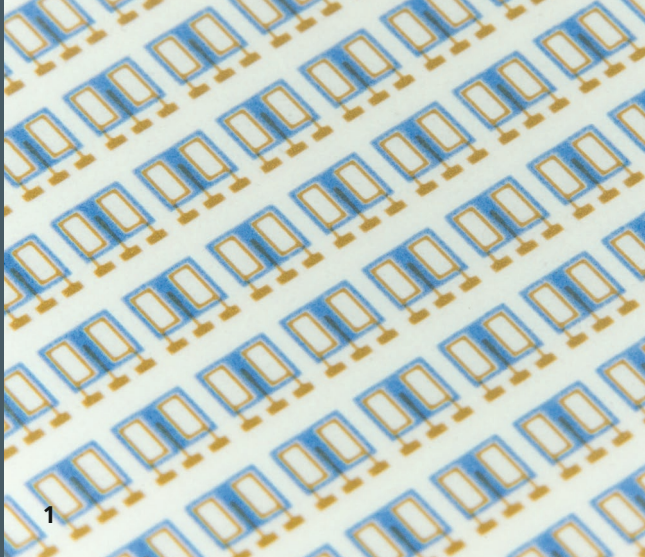
oberfläche vorliegt. Somit lassen sich typische Innenraum-schadstoffe wie Formaldehyd oder Acetaldehyd in unschädliche Verbindungen umwandeln. Auch in Innenräumen von Fahrzeugen und Flugzeugen oder im Haushaltsbereich wie in Küchendunstabzugshauben können photokatalytische Schichten dazu beitragen, das Raumklima zu verbessern. Zudem wirken sie antibakteriell und antimikrobiell, womit Schimmelbefall verhindert werden kann.

## DESINFEKTION

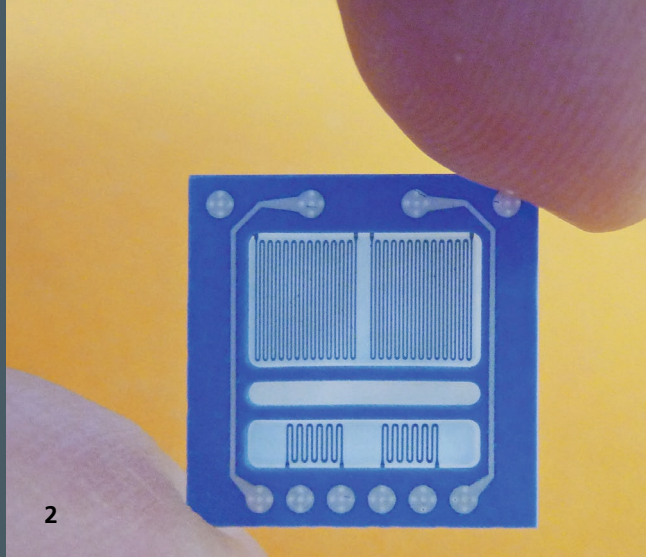
Filter und Luftbehandlungsanlagen können unter bestimmten Bedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit) aufgrund der im Luftstrom enthaltenen Bakterien und Viren zu einer starken Verkeimung der Luft führen. Keramische Komponenten mit Adsorbentien und antibakteriell wirkenden Oberflächen helfen hierbei entscheidend bei der Desinfektion von Raumluft. Ähnlich wie bei der Geruchselimination kann auch der Einsatz von photokatalytisch wirkenden Oberflächen zu einer Verringerung der Belastung beitragen und UVC-Anlagen effizienter machen.

**3** Große Zentrifuge zur Beschichtung offenzelliger Schaumkeramik.

**4** Offenzellige Schaumkeramikpellets für katalytische Schüttungen.



1



2

## SENSORIK

### SENSORSYSTEME

Durch die chemische Beständigkeit keramischer Werkstoffe auch bei hohen Temperaturen sind keramikbasierte Sensoren insbesondere für einen Einsatz in harschen Umgebungen wie der Abgasnachbehandlung und -reinigung geeignet. Das Fraunhofer IKTS bietet hier komplexe Sensorelemente und Sensorintegrationslösungen aus einer Hand. Ausgehend von der Synthese funktionskeramischer oder der Verarbeitung kommerzieller Werkstoffe entwickelt das IKTS Ruß-, Massenstrom-, Temperatur- und Gassensoren für die unterschiedlichsten Einsatzumgebungen. Für die Herstellung der Sensorelemente auf Basis der Dickschicht- und Multilayertechnologie verfügt das IKTS über ein langjähriges Know-how im Bereich keramischer Pasten und Tinten, die mit Hilfe verschiedener Drucktechnologien auf keramische, metallische sowie polymere Substrate abgeschieden werden. Mittels hochtemperaturtauglicher Aufbau- und Verbindungstechniken können diese Komponenten anschließend zuverlässig in Messsysteme integriert werden.

Um zuverlässige Diagnosefunktionen in der automobilen Abgasnachbehandlung zu erreichen, sind robuste Rußsensoren erforderlich, die den auftretenden aggressiven Atmosphären sowie der hohen Temperatur- und Vibrationsbelastung standhalten. Hierfür hat das Fraunhofer IKTS resistive Rußsensoren in Anwendung gebracht, die hinsichtlich ihrer Widerstands- und Heizleiterstrukturen, Schichteigenschaften und Packagingverfahren optimiert wurden.

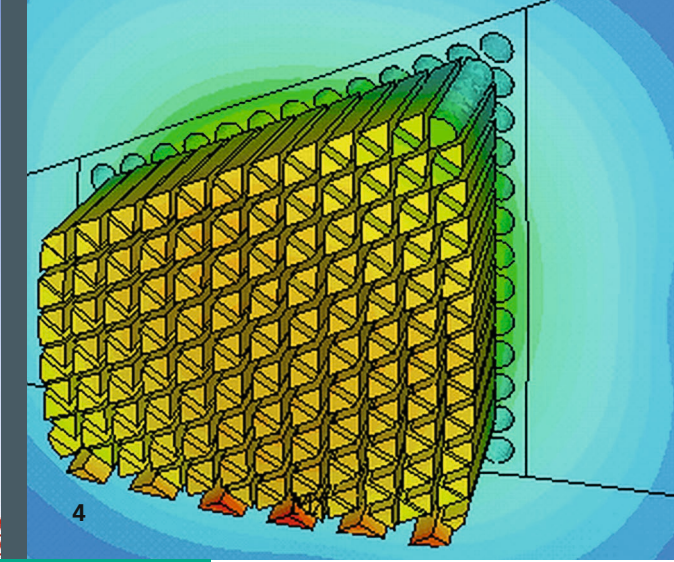
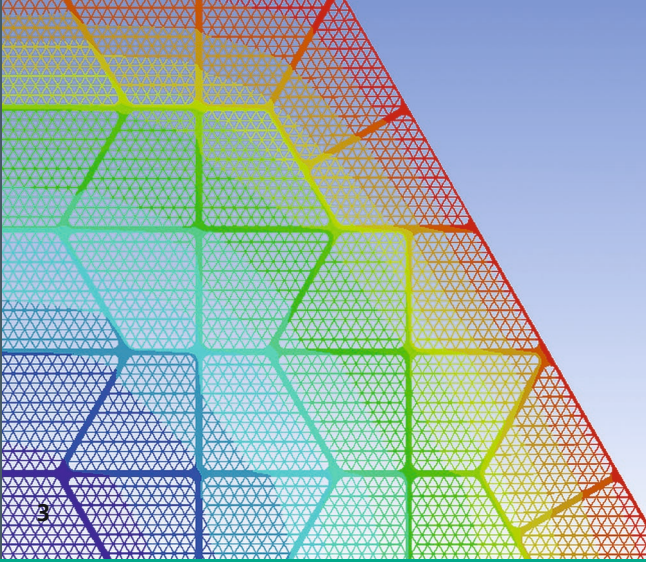
Für eine Reduzierung der Partikel-, Stickstoffoxid- und Kohlenstoffdioxidemission während Verbrennungsvorgängen entwickelt das Fraunhofer IKTS pulsationsfähige Massenstromsensoren. Damit ist eine bessere sensorisch geregelte Abgassteuerung, insbesondere für die Abgasrückführung, realisierbar. Die Massenstromsensoren sind sowohl für die Bestimmung des Abgasmassenstroms von Dieselmotoren und Biogasanlagen

geeignet als auch für den Einsatz in portablen Emissionsmonitoringsystemen (PEMS). Der hybride Materialansatz aus einem miniaturisierten, hochrobusten Sensorelement und einem thermisch entkoppeltem Gehäuse sowie einer angepassten, hochtemperaturtauglichen Aufbau- und Verbindungstechnologie ermöglicht den Einsatz unter rauen Umgebungsbedingungen.

In der Abgasnachbehandlung und -reinigung spielt die Prozesstemperatur eine wichtige Rolle, da sie Informationen über die Effizienz und den Anlagenzustand liefert. Um die Prozesstemperatur an möglichst vielen Positionen messen zu können, bedarf es kompakter und integrierbarer Sensorlösungen. Hierfür verfügt das Fraunhofer IKTS über HTCC-basierte Temperatursensoren, mit denen es möglich ist, in Bereichen bis zu 1000 °C mit hoher Präzision zu messen. In Verbindung mit speziell entwickelten Gehäusekonzepten können diese Elemente ohne zusätzliche Kapselung zum Einsatz kommen und garantieren dadurch geringste Ansprechzeiten.

Für die Detektion von O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> oder NH<sub>3</sub> bietet das Fraunhofer IKTS verschiedene Gassensoren an. Durch die geeignete Wahl von Messprinzip, Sensordesign und Betriebsparametern lassen sich diese an die verschiedensten Betriebsbedingungen anpassen. Amperimetrische Sauerstoffsensoren auf Basis von Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid können beispielsweise bis zu einer Temperatur von 700 °C in einem Messbereich von 0 bis 100 Vol.-% eingesetzt werden. Zur Charakterisierung der Wechselwirkung mit Gasen sowie weiterer spezifischer Werkstoffeigenschaften stehen am IKTS zahlreiche Messplätze zur Verfügung.

- 1 CO<sub>2</sub>-Sensorelemente im Mehrfachnutzen.
- 2 Pulsationsfähiger Luftmassenmesser zum Einsatz im Abgas von Verbrennungskraftmaschinen.



## MATERIAL- UND PROZESSANALYSE

### MATERIALCHARAKTERISIERUNG

Das Fraunhofer IKTS bietet als akkreditierter und audierter Dienstleister zahlreiche Charakterisierungsmethoden und umfangreiches Equipment für die Entwicklung von keramischen Filtern, Adsorbentien, Katalysatoren und Katalysatorträgern. Dies umfasst sowohl die Analyse, Bewertung und Optimierung von Werkstoffen und Bauteilen als auch die damit verbundenen Fertigungsverfahren. Wichtige Parameter sind hierbei die Permeabilität, spezifische Oberfläche, Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit oder das Durchströmungsverhalten.

Neben Standardmethoden stehen spezielle, zum Teil weltweit einzigartige Untersuchungsmöglichkeiten zur Verfügung. Die Methoden reichen von der Partikel- und Suspensionscharakterisierung über die keramographische Gefügepräparation bis hin zur quantitativen Phasen- und Gefügeanalyse. Darüber hinaus gibt es eine breite Palette mechanischer, thermoanalytischer und -physikalischer Charakterisierungstechniken. Die Beherrschung dieser Methoden ist mit detailliertem Prozesswissen sowie werkstoffwissenschaftlichen Kenntnissen gekoppelt, was eine fundierte Interpretation der Ergebnisse ermöglicht.

Einen weiteren Schwerpunkt bilden zerstörungsfreie Prüfverfahren, die über den gesamten Produktlebenszyklus von der Entwicklung bis zur Prüfung im Produktionsprozess zum Einsatz kommen. Dabei können traditionelle Verfahren wie Ultraschall, Wirbelstrom, Röntgenprüfung oder akustische Diagnostik mit neuen Methoden wie Laser-Speckle-Photometrie oder optischer Kohärenztomographie kombiniert oder ergänzt werden. Zudem lassen sich die bei der Prüfung erhobenen Daten mit dynamischen Simulationsmodellen des Bauteils oder Systems verknüpfen und damit die Lebensdauer vorhersagen.

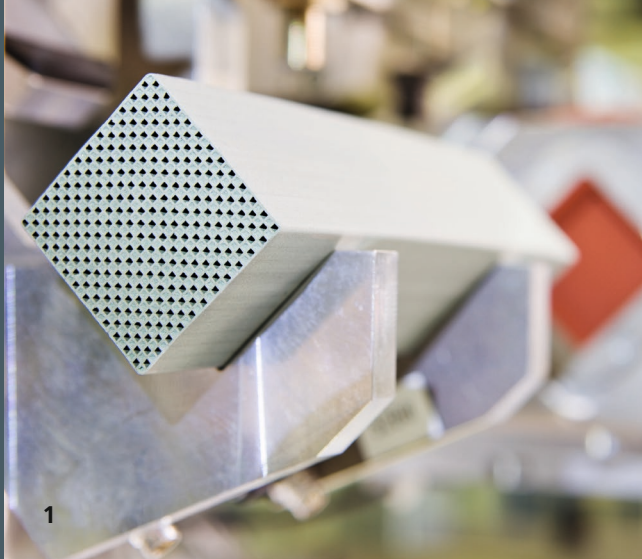
### SIMULATION UND MODELIERUNG

Durch die Simulation von Werkstoffeigenschaften, Bauteilen, Fertigungstechnologien und Systemumgebungen können Entwicklungsrisiken minimiert und Produktzyklen wesentlich verkürzt werden. Das Fraunhofer IKTS greift daher bereits in frühen Entwicklungsphasen auf eine Softwareausstattung (FEM, CFD, Systemsimulation) zurück, um thermische, mechanische, strömungs- und reaktionstechnische Vorgänge in Bauteilen und Systemen zu simulieren. Aufgrund langjähriger Erfahrungen und der Nutzung flexibler Programmtools können auch nutzerspezifische Modellbeschreibungen für neuartige Anwendungen, insbesondere mit gekoppelten Mechanismen (Kopfeld-Analysen, Multiphysics), erstellt und analysiert werden.

So lässt sich beispielsweise das Strömungsverhalten in Filterelementen simulieren, um einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Trägerstrukturen und Schichten hinsichtlich der Permeatleistung vorzunehmen. Darüber hinaus kann auch der Einfluss der strukturellen Eigenschaften von keramischen Schäumen, wie Zellgröße und Stegdimension, auf die Filterperformance untersucht werden. Auf Basis dieser Kenngrößen wurden numerische Modelle entwickelt und verifiziert, die künftig eine realistische Abschätzung der Leistung von Filterschäumen erlauben und damit eine optimale Auswahl und Gestaltung der Schaumstrukturen ermöglichen.

**3** *Simulation der thermomechanischen Belastungen eines Dieselpartikelfilters.*

**4** *Simulation der Mundstückdeformation beim Extrudieren von Wabenkörpern.*



## AUSSTATTUNG

### Extrusion von Waben- und Rohrgeometrien

- Aufbereitung mit Eirichmischer und Doppel-Z-Kneter
- Kolbenextruder und verschiedene Schneckenextruder
- Verschiedene Mundstücke für Waben- und Rohrgeometrien, kundenspezifische Mundstücke möglich

### Herstellung von offenzelliger Schaumkeramik nach dem Schwartzwalderverfahren

- Halbautomatische Imprägnieranlage für Schaum
- Einfache und mehrstufige Walzenanlage für Schaumbeschichtung
- Zentrifugen für Schaumbeschichtung

### Calcinierung / Wärmebehandlung

- Luftsinteröfen bis 1700 °C
- Schutzgasöfen bis 2500 °C (Ar, N<sub>2</sub>, Vakuum)
- Schnellbrand-Durchlauföfen bis 1100 °C (Luft)
- Hydrothermale Alterungseinheit bis 650 °C, 10% H<sub>2</sub>O

### Beschichtung

- Tauchbeschichtung für einzelne Segmente und kleine Filtersubstrate
- Verschieden große Zentrifugen

### Prüfstände Filtration

- Beruungs-, Gegendruck- und Partikelprüfstand für Segmente und Filterscheiben (RT)

- Beruungs-, Gegendruck- und Partikelprüfstand für Filter bis 12" oder industrielle Heißgasfiltration bis 1000 °C (Heißgasprüfstand), auch zur Dauererprobung von Filtern bzw. zyklische Untersuchungen zur Lebensdauer, Drop-to-Idle
- Gegendruckmessungen bis 12 bar an kleinen Probengeometrien (Porometer)
- Druckverlustprüfstand für Schaumkeramiken bis 20 m/s
- Zellweitenbestimmung für zelluläre Systeme

### Prüfstände Katalyse

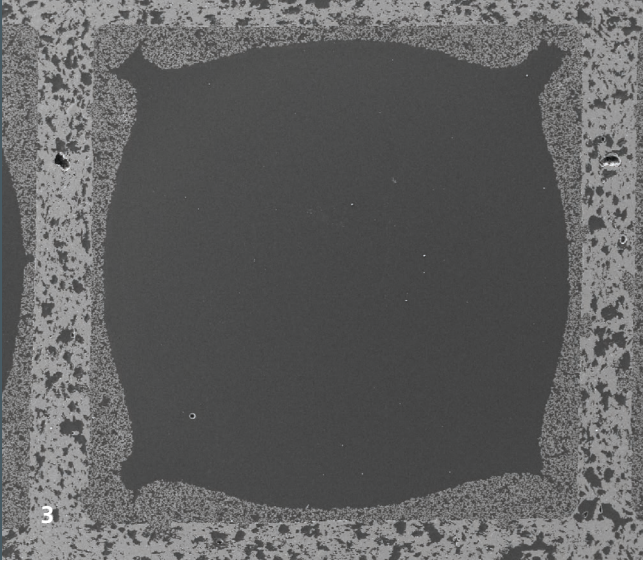
- Vollautomatisches Chemisorptions-Analysengerät (Autochem) für chemische Adsorptions- und temperaturprogrammierte Reaktionen an Pulverproben
- Synthesegasprüfstände zur Untersuchung und Alterung von Wabekörpern und Bohrkernproben, statische und hochdynamische Heiz- und Gasdosierungsregime, synthetische Gasgemische (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO/NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HC, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>+C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)

### Prüfung mechanischer Eigenschaften

- Druckfestigkeitsprüfung an Filtern bis 10 bar
- Druckfestigkeitsprüfung für Schaumkeramiken
- Druckfestigkeitsprüfung für Wabengeometrien in A-, B- oder C-Richtung
- Festigkeitsprüfung für Wabengeometrien nach ASTM C1674-08 bei RT und < 1600 °C an Luft
- Bestimmung von E-Moduli
- Thermische und Thermoschockbeständigkeit

1 Halbautomatische Plugginganlage für Filtersegmente.

2 Autochem-Prüfstand für Chemisorptionsanalysen an Katalysatoren.



### Chemische Zusammensetzung

- Elementanalyse (EDX)
- Röntgenfluoreszenz-Analyse (XRF)
- Induktiv gekoppelte Plasma-Atomemissionsspektroskopie (ICP-AES)
- Qualitative und quantitative Phasenanalyse (XRD), auch mit streifendem Einfallswinkel, von RT bis 1400 °C

### Partikel- und Suspensionscharakterisierung

- Partikelgrößenverteilung, Partikelform
- Spezifische Oberfläche BET (N<sub>2</sub>/Kr-Adsorption und -Desorption)
- Porenverteilung (Hg-Porosimetrie, Permeationsporosimetrie)
- Oberflächenladung, Zetapotential
- Rheologie, Viskosität
- Dichtebestimmung (Rohdichte, Reindichte, Pycnometrie)
- Sedimentationsstabilität

### Gefüge- und Werkstoffcharakterisierung

- Materialgraphische Probenpräparation (mechanische Präparation, chemische und physikalische Ätzverfahren, Ionenstrahlpräparation)
- Mikroskopie (Lichtmikroskopie, Stereolichtmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie [REM/FESEM], Transmissionselektronenmikroskopie [TEM] etc.)
- Schichtdickenanalyse
- Edelmetall-Kristallite und Partikelgröße
- Röntgen-Computer-Tomographie

### Thermische Analyse und Thermophysik

- Thermogravimetrie (TG)
- Thermomechanische Analyse (TMA)
- Thermodilatometrie (TD)
- Wärmeleitfähigkeit bei RT
- Wärmekapazität

### Modellierung und Simulation

- Finite-Elemente-Analyse (FEM), ANSYS (Emag/Mech), COMSOL Multiphysics, FlexPDE, Atila
- Strömungssimulation (Fluent)
- Systemsimulation (Matlab/Simulink, Simulation X, Dymola/Modelica)
- Thermodynamische Simulation (Factsage)

### Akkreditierte Labore (DIN EN ISO/EC 17025)

- Thermoanalyse und Thermophysik
- Partikel- und Suspensionscharakterisierung
- Labor für Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit

**3** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines katalytisch beschichteten Substrats am Anschliff.

**4** Kontinuierliche mehrstufige Anlage für Schaumbeschichtung.



## KOMPETENZEN

### Entwicklung von Partikelfiltern und Katalysatorträgern, Musterfertigung

Material- und Technologieentwicklung zur Herstellung von keramischen Partikelfiltern und katalytischen Beschichtungen auf keramischen Substraten (hochporöse Wabenkörper und Filtersegmente, offenzellige Schäume, Schaum- und Katalysatorpellets), Auslegung und Optimierung von Partikelfiltern, Muster- und Kleinserienfertigung

#### Materialauswahl für Substrate

- Siliciumcarbid (SSiC, LPS-SiC, RSiC, SiSiC tongebundenes SiC, glasgebundenes SiC)
- Cordierit
- Aluminiumoxid
- Zeolith
- Mullit
- Metallschäume (Stahl, Nichteisenmetall)

#### Katalytische und adsorptive Beschichtungen

Homogene schlickerbasierte Beschichtungen und Beschichtungsverfahren mit definierter Schichtdicke/Beladung durch Entwicklung und Anwendung von Suspensionen mit angepassten rheologischen Eigenschaften

- Innere und aufliegende Beschichtung
- Ein- oder mehrstufige Beschichtung
- Tauchbeschichtung

#### Post-mortem-Analysen

- Rußbeladung, Rußanalyse (physikalisch)
- Aschebeladung, Ascheeinlagerung, Ascheanalyse (chemisch und physikalisch)
- Post-mortem-Analyse an Bauteilen und Einzelproben (Performance, mechanisch, chemisch)

### Werkstoff- und Bauteilprüfung

Analytik für DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren (SCR, LNT, sDPF) und Oxidationskatalysatoren (DOC, cDPF, TWC)

- Spezifische Oberfläche
- Makro- und Mikrostruktur
- Chemische Zusammensetzung
- Thermische Beständigkeit
- Rußoxidationsaktivität
- Katalysator-Dispersion (Chemisorption)
- Katalytische Aktivität (verschiedene Synthesegasprüfstände bis 900 °C, Temperaturprogrammierte Desorption TPD, Reaktion TPR, Oxidation TPO, NO<sub>x</sub>-Reduzierung)
- Lebensdauerbewertung, -abschätzung (Heißgasprüfstand)
- Hydrothermale Alterung

#### Filteranalytik

- Gegendruck und Filtrationseffizienz bei RT und bis 1000 °C
- Porengröße und Porengrößenverteilung
- Berußung, Filterregeneration
- Partikelabscheideleistung
- Dauererprobung am Heißgasprüfstand

#### Sensorik

- Werkstoffe: Oxid- und Nichtoxidkeramik, Funktionskeramik, Polymerkeramik als Pulver, Folien, Pasten und Tinten
- Technologien: Dünn- und Dickschichttechnologien, Aufbau- und Verbindungstechnik
- Systemintegration

**1** Synthesegasprüfstand für Abgasnachbehandlungskatalysatoren.

**2** Werkstoffanalyse am Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop.



## KOOPERATIONSMODELLE

Innovation und Entwicklung sind Bausteine für eine erfolgsversprechende Unternehmenszukunft. Um Wettbewerbsvorteile zu generieren, bietet Fraunhofer maßgeschneiderte Kooperationsmöglichkeiten für die bestmögliche Form der Zusammenarbeit für Unternehmen. Damit können Entwicklungskompetenzen vom Kunden kurzfristig und bedarfsorientiert abgerufen und genutzt werden.

### **Einzelaufträge**

Der klassische Fall einer Kooperation ist der Einzelauftrag. Das Unternehmen sieht einen Forschungs- oder Entwicklungsbedarf. Das Fraunhofer IKTS entwickelt entsprechend der Anforderungen des Unternehmens eine termin- und qualitätsgerechte Lösung.

### **Verbundprojekte**

Manche Problemstellungen sind so komplex, dass mehrere Partner die Lösung entwickeln müssen. Dann steht das gesamte Umfeld der Fraunhofer-Institute zur Verfügung. Auch externe Partner können hinzugezogen werden.

### **Strategische Partnerschaften und Innovationscluster**

Aus Vorlaufforschung, die zunächst unabhängig von Aufträgen erfolgt, ergeben sich häufig lang andauernde Partnerschaften mit Unternehmen auf regionaler und internationaler Ebene.

### **Ausgründungen**

Fraunhofer-Mitarbeiter machen sich oft mit einer Neuentwicklung selbstständig, an der sich die Fraunhofer-Gesellschaft beteiligen kann. Im Einzelfall sind sogar strategische Beteiligungen und Joint Ventures möglich. Auch die Auftraggeber einer neuen Entwicklung können Teilhaber des Spin-off-Unternehmens werden.

### **Lizenzierungsmodelle**

Lizenzen räumen Dritten ein Nutzungsrecht an gewerblichen Schutzrechten unter definierten Bedingungen ein. Damit können Innovationen genutzt werden, wenn die eigene Weiterentwicklung zu hohe Kosten verursachen würde, die Kapazitäten zur Markteinführung nicht ausreichend oder die Innovation nicht in das bestehende Leistungsprogramm passen würde. Das Fraunhofer IKTS bietet flexible Lizenzmodelle an, die zum unternehmensweiten Einsatz, zur Optimierung des eigenen Angebots oder der Vermarktung an Endkunden genutzt werden können.

# KURZPORTRÄT DES FRAUNHOFER IKTS

Das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS betreibt anwendungsorientierte Forschung für Hochleistungskeramik. Die drei Instituts-teile in Dresden und Hermsdorf (Thüringen) formen gemeinsam das größte Keramikforschungsinstitut Europas.

Als Forschungs- und Technologiedienstleister entwickelt das Fraunhofer IKTS moderne keramische Hochleistungswerkstoffe, industrierelevante Herstellungsverfahren sowie prototypische Bauteile und Systeme in vollständigen Fertigungs-linien bis in den Pilotmaßstab. Darüber hinaus umfasst das Forschungsportfolio die Kompetenzen Werkstoffdiagnose und -prüfung. Die Prüfverfahren aus den Bereichen Akustik, Elektromagnetik, Optik und Mikroskopie tragen maßgeblich zur Qualitätssicherung von Produkten und Anlagen bei.

Das Fraunhofer IKTS hat es sich zur Aufgabe gemacht, keramische Materialien und Technologien nicht nur singulär, sondern im Kontext der Anwendung über die gesamte Wertschöpfungskette zu betrachten. Dadurch konnten bereits in unterschiedlichen Bereichen der Abgasreinigung Entwicklungen wie Dieselpartikel-filter für Offroad- und Kleinmotoren, Filter für Holzöfen oder hochtemperatur-beständige Heißgasentstaubungsfilter und Katalysatoren von den Ausgangsmate-rialien bis hin zu komplexen Komponenten erfolgreich umgesetzt werden.



[www.ikts.fraunhofer.de](http://www.ikts.fraunhofer.de)

## KONTAKT

Industrielösungen  
Abgasreinigung

Dipl.-Krist. Jörg Adler  
Fraunhofer-Institut für  
Keramische Technologien  
und Systeme IKTS

Winterbergstr. 28  
01277 Dresden  
Telefon +49 351 2553-7515  
[joerg.adler@ikts.fraunhofer.de](mailto:joerg.adler@ikts.fraunhofer.de)