

Die Abgasnachbehandlung der Zukunft

Das Abgas moderner Verbrennungsmotoren ist so sauber wie nie zuvor. Dennoch zeigen aktuelle Vorhaben der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV), dass eine weitere Reduktion der Schadstoffemissionen vor allem im realen Betrieb möglich ist. Zudem stellen Elektrifizierung und die Einführung alternativer Kraftstoffe neue Anforderungen an die Abgasnachbehandlung.

1 FORSCHUNGSSCHWERPUNKT ABGASNACHBEHANDLUNG

Die Entwicklung von Abgasnachbehandlungssystemen stellt einen wesentlichen Baustein moderner Motorenentwicklung dar. Die von der FVV initiierte Forschung beschäftigt sich einerseits damit, die grundlegenden Wirkmechanismen bei der Entstehung und Beseitigung einzelner Schadstoffkomponenten zu verstehen. Wechselwirkungen mit der Kraftstoffzusammensetzung und anderen Phänomenen wie der Alterung von Katalysatoren sind dabei wesentliche Forschungsgegenstände. Andererseits ermöglicht nur eine enge Abstimmung der Abgasreinigung auf den Motor und dessen Betriebsbedingungen, dass die Grenzwerte für Luftschadstoff-Emissionen - wie Stickstoffoxid (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC), Ammoniak (NH_3), Staub einschließlich der Feinstaubanteile PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ sowie Kohlenmonoxid (CO) - und für klimawirksame Treibhausgas-Emissionen - wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O) - eingehalten werden. Auch diese Wechselwirkungen einschließlich der dafür notwendigen



STIMMEN AUS DER FVV



© Daimler

Prof. Dr.-Ing. Uwe Gärtner leitet in der Nfz-Motorenentwicklung der Daimler AG die Vorentwicklung Thermodynamik & Emissionen sowie die Wettbewerbsanalyse Motoren. Er ist Honorarprofessor für Brennvorfahren/Thermodynamik an der HTW Dresden und leitet im FVV-Forschungsbereich Motoren die Planungsgruppe 6 „Emission & Immission“. „Die in der FVV koordinierte Forschung führt das Wissen von Ingenieuren, Physikern und Chemikern zusammen.“



© OTH Regensburg

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Rabl lehrt an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg Verbrennungsmotortechnologie und Fahrzeugtechnik und leitet das Labor Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlung. „Weniger Schadstoffe bei kaltem Abgas, das ist ein wichtiges Forschungsziel.“



© BASF Catalysts Germany

Dr.-Ing. Uwe Zink ist Technical Manager Regulatory Affairs der BASF Catalysts Germany GmbH und langjähriges Mitglied der FVV-Planungsgruppe 6 „Emission & Immission“. „Letztlich geht es darum, niedrigstes Emissionsniveau unter realen Fahrbedingungen zu erreichen.“

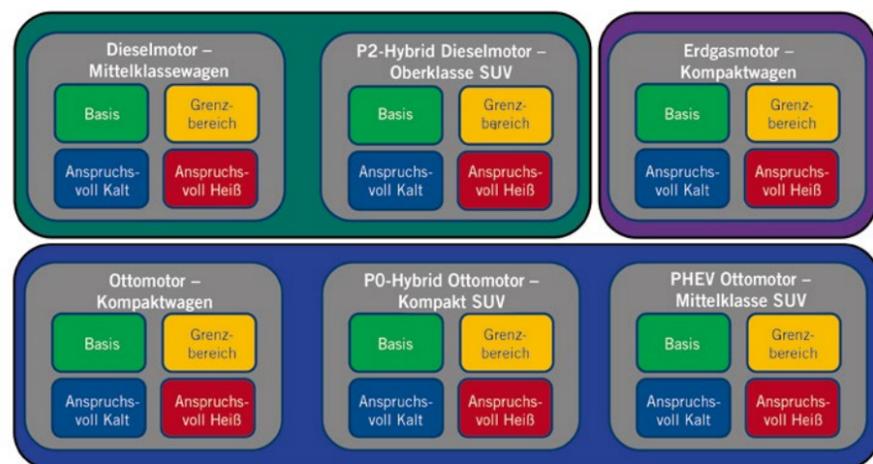


BILD 1 Untersuchte Fahrzeug-Antriebs-Kombinationen und Fahrzyklen im Vorhaben „Anforderungen an die Abgasnachbehandlung 2025+“ (© VKM / TU Darmstadt)

Modellierung sind ein wichtiger Gegenstand der in der FVV-Planungsgruppe „Emission & Immission“ unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Uwe Gärtner initiierten Vorhaben.

Das in FVV-Vorhaben erarbeitete Grundlagenverständnis hat wesentlich dazu beigetragen, dass der Schadstoffausstoß von Verbrennungsmotoren in den vergangenen 25 Jahren um mehrere Größenordnungen sank. Ein gutes Beispiel dafür ist die selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden, die bereits in den 1990er-Jahren Gegenstand der Forschung war. Die auf fundierten wissenschaftlichen Untersuchungen basierenden Ergebnisse waren eine Voraussetzung dafür, dass sich wässrige Harnstofflösung als Reduktionsmittel für die SCR-Katalyse rasch als industrieller Standard etablieren konnte.

Auch wenn moderne Verbrennungsmotoren sehr niedrige Emissionswerte aufweisen, so ist doch zu erwarten, dass weiter verschärfte Grenzwerte und Testbedingungen in nochmals höheren Anforderungen an die Abgaszusammensetzung resultieren. Da es technisch unmöglich ist, diese Anforderungen allein durch Absenken der Rohemissionen zu erfüllen, behält die Erforschung der Abgasnachbehandlung einen hohen Stellenwert.

2 ABGASNACHBEHANDLUNG DER ZUKUNFT

Um die Randbedingungen für künftige Abgasnachbehandlungssysteme zu analysieren, hat die FVV aus Eigenmitteln zwei Forschungsprojekte initiiert. Die

Vorhaben sollen die Frage beantworten, auf welche Ziele hin Nachbehandlungssysteme für Pkw und für Nutzfahrzeuge entwickelt werden sollen. Dafür wurde, entsprechend dem vorwettbewerblichen Charakter der Forschung, die Zeit ab dem Jahr 2025 betrachtet.

2.1 ABGASNACHBEHANDLUNG PKW
Den Anfang machte das Ende 2017 abgeschlossene Vorhaben „Anforderungen an die Abgasnachbehandlung 2025+“, das am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt bearbeitet wurde. Obwohl noch vor Verabschiedung der RDE-Gesetzgebung geplant, war die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten unter realen Fahrbedingungen ein wesentlicher Schwerpunkt des Projektes. Den Forschern gelang es, eine Simulationsumgebung einzurichten, mit der sich virtuelle RDE-Strecken aufbauen und gezielt emissionskritische Fahrmanöver identifizieren lassen. Dafür war es notwendig, die Rohemissionen, Abgasmasenströme sowie Temperaturverläufe für verschiedene Fahrzeug-Antrieb-Kombinationen detailliert zu modellieren. Diese Kombinationen wurden vorab vor dem Hintergrund eines strengen CO₂-Flottengrenzwertes von 75 g/km sowie dem anhaltenden Trend zu relativ schweren und großen „Sport Utility Vehicles“ definiert, **BILD 1**. Dies führt dazu, dass zwei der Fahrzeugmodelle über ein 48-V-Hybridsystem und eines über einen Plug-in-Hybridantrieb verfügen.

Die mit der Simulationsumgebung erzielten Ergebnisse [1] zeigen unter anderem:

- Bei einem konventionellen Ottomotor stammen 50 % der Stickoxidemissionen aus wenigen Hochlastbereichen. Eine 48-V-Hybridisierung in P0-Anordnung eignet sich dabei nicht als Gegenmaßnahme.
- Bei einem Dieselmotor trägt die 48-V-Hybridisierung dazu bei, Emissionsspitzen im urbanen Verkehr zu vermeiden. Außerstädtisch sind jedoch sehr hohe Konvertierungsraten notwendig, um die Emissionsziele zu erreichen. Gegenläufig wirkt dabei die starke Auskühlung des Abgassystems bei langen Bergabfahrten.
- Es konnte nachgewiesen werden, dass ein mit CNG betriebener Ottomotor unter allen Betriebsbedingungen wesentlich geringere Emissionen aufweist als konventionelle Ottomotoren.
- Mit einer geeigneten Betriebsstrategie kann bei einem Plug-in-Hybridantrieb das Emissionsverhalten gänzlich von dem RDE-Streckenverlauf entkoppelt werden.

Es handelt sich dabei um beispielhafte Ergebnisse auf Basis realistischer, aber abstrahierter Fahrzeug-Antrieb-Kombinationen. Mit Hilfe der entwickelten Methodik ist es künftig möglich, das Emissionsverhalten realer Antriebe auch ohne aufwändige Straßentests abzuschätzen.

2.2 ABGASNACHBEHANDLUNG NFZ UND ARBEITSMASCHINEN
Da sich die für Pkw entwickelte Methodik bewährt hat, soll sie nun in dem vom Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen bearbeiteten Vorhaben „Anforderungen an die Abgas-

nachbehandlung 2030+“ auf Nutzfahrzeuge und Arbeitsmaschinen übertragen werden. Eine Herausforderung stellt dabei die gegenüber dem Pkw weitaus höhere Varianz an Fahrzeug-Antriebs-Kombinationen dar – das betrachtete Spektrum reicht vom Lieferwagen über den Linienbus bis zum Fernverkehrs-Lkw sowie Flurförderzeugen und Erntemaschinen. Zudem unterscheiden sich sowohl die im Betrieb auftretenden Lastzyklen als auch die Emissionsgesetzgebung für die Fahrzeuge und Maschinen. All diese Aspekte sollen beim Aufbau einer Simulationsumgebung Berücksichtigung finden, die auch die Modelle für verschiedene Technologien zur Abgasreinigung umfasst. Am Ende des bis Anfang 2020 laufenden Vorhabens wird auch in diesem Fall ein umfassendes Werkzeug zur Verfügung stehen, das die für eine gezielte Entwicklung von Emissionsminderungsmaßnahmen in einem frühen Entwicklungsstadium nötigen Randbedingungen und Anforderungen bereitstellt [2].

3 REDUKTION DER EMISSION PRIORITÄRER SCHADSTOFFE

Die meisten FVV-Vorhaben, die in der Planungsgruppe „Emission & Immission“ initiiert werden, beschäftigen sich mit der Reduktion einzelner Schadstoffe. Das folgende Kapitel stellt dazu exemplarisch wichtige Ergebnisse der vergangenen Jahre vor.

3.1 METHANKATALYSE

Wird Erdgas als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren eingesetzt, so führt dies aufgrund des geringen Kohlenstoffgehalts zu einer deutlichen Absenkung der kilometerbezogenen CO₂-Emissionen. Da in die Umwelt freigesetztes Methan jedoch einen deutlich höheren Treibhausgaseffekt verursacht als Kohlendioxid, ist es für die Gesamtbilanz wesentlich, unverbranntes Methan in der Abgasanlage katalytisch umzusetzen. Die Methankatalyse ist aufgrund hoher benötigter Reaktionstemperaturen ohnehin anspruchsvoll. In einem ersten, 2013 abgeschlossenen Vorhaben „Methan katalytisch I“ konnte gezeigt werden, dass die Konvertierungsraten eines Palladium-Platin-Katalysators unter typischen Betriebsbedingungen rasch absanken, insbesondere wenn das Abgas auch Schwefeldioxid enthält. Im Folgevorhaben „Methan katalytisch II“ [3], bearbeitet am Institut für Technische Chemie und Polymerchemie des Karlsruhe Institut für Technologie, wurden die Wirkmechanismen der Deaktivierung sowie verschiedene Möglichkeiten der Reaktivierung untersucht, **BILD 2**. Die Oxidierung von Palladium erwies sich als wesentliche Ursache für die Deaktivierung. Durch eine fünfminütige Beaufschlagung des Katalysators mit fettem Abgas ohne Restsauerstoff kann die Palladiumoxidation vollständig rückgängig gemacht werden. Allerdings ist auch diese Reak-

tion stark temperaturabhängig. Weitere Einflussfaktoren auf die Katalysatorvergiftung – etwa die Materialzusammensetzung des Trägers oder der Ladedruck des Turboladers – ließen sich identifizieren und teilweise quantifizieren.

3.2 FORMALDEHYD

In der dezentralen Stromversorgung spielen stationäre Gasmotoren eine zunehmend wichtige Rolle. Sie erzielen im Magerbetrieb sehr hohe Wirkungsgrade. Aufgrund des hohen Luftüberschusses weisen sie jedoch höhere Emissionen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen wie Formaldehyd (CH₂O) auf. Dass Methanal – so der korrekte chemische Name für das Aldehyd – reduziert werden kann, ohne dass die sehr gute CO₂-Bilanz von Gasmotoren leidet, zeigt das Anfang 2017 abgeschlossene Vorhaben „Formaldehyd“ [4]. Dabei arbeiteten der Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität München und das Institut für Technische Chemie und Polymerchemie des Karlsruher Instituts für Technologie eng zusammen. Zunächst haben Münchner Forscher untersucht, welche Motorparameter sie verändern können, um die Rohemission abzusenken. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verbesserung der CH₂O-Rohemission grundsätzlich entweder zulasten des Wirkungsgrades geht oder zu erhöhten Stickoxidemissionen führt, **TABELLE 1**. Allerdings sind durch

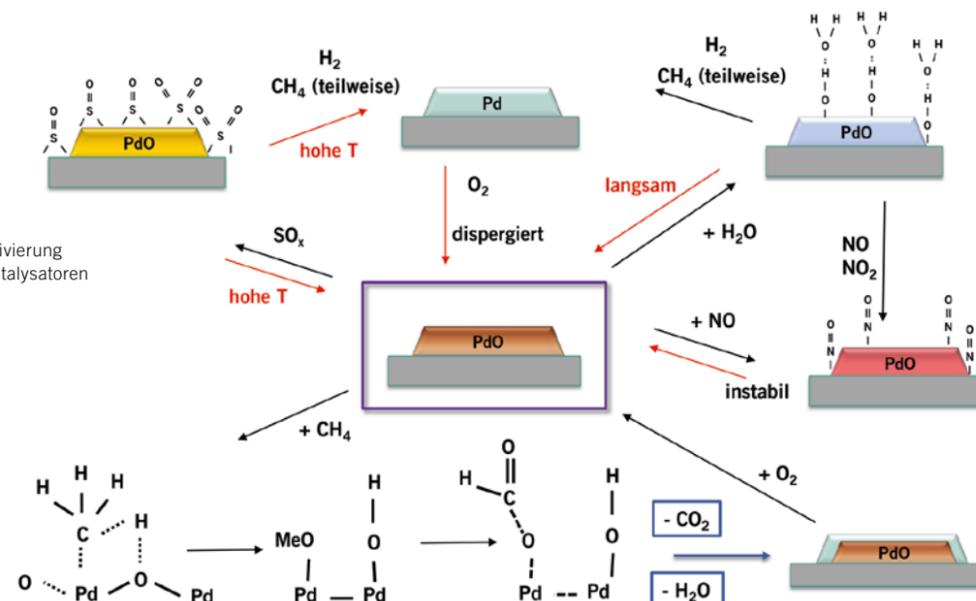


BILD 2 Einflussgrößen auf die Deaktivierung und Reaktivierung von Palladiumkatalysatoren (© ITCP / KIT Karlsruhe)

-	HCHO	η_i	NO _x
Lasterhöhung	+	+	-
Erhöhung Ladelufttemperatur	+	--	-
Erhöhung Kühlwassertemperatur	+	+	-
Niedrigerer Abgasgegendruck	+	++	-
Erhöhung Kompressionsverhältnis	-	+	-
EU50 später	+	--	++
Inhomogenes Gemisch	0	-	0
Millersteuerzeit Einlass (Lambda konstant)	--	++	+
Erhöhung Ventilüberschneidung	-	-	0
Optimierte Brennraumgeometrie	+	+	0

++ Verbesserung von mehr als 20 % HCHO (Reduktion) bzw. mehr als + 0.5 η_i (Steigerung)
 + Verbesserung zwischen 5 - 20 % HCHO (Reduktion) bzw. weniger als + 0.5 η_i (Steigerung)
 0 kaum Änderungen
 - Verschlechterung zwischen 5 - 20 % HCHO (Steigerung) bzw. weniger als - 0.5 η_i (Reduktion)
 -- Verschlechterung von mehr als 20 % HCHO (Steigerung) bzw. weniger als - 0.5 η_i (Reduktion)

TABELLE 1 Veränderung der Rohemissionen von CH₂O und NO_x sowie des Wirkungsgrades durch Motorparametervariation (© LVK / TU München)

optimale Anpassung der Ventilsteuerzeiten Rohemissionswerte erreichbar, die bei Einsatz optimaler Katalysator-technik sehr niedrige Formaldehyd- als auch Stickoxide-Grenzwerte zulassen und gleichzeitig einen Wirkungsgrad von rund 45 % erlauben. Parallel untersuchten die Chemiker in Karlsruhe die Leistungsfähigkeit von Platin-Oxidationskatalysatoren. Sie konnten nachweisen, dass unter Standardbedingungen kommerziell verfügbare Katalysatoren CH₂O-Umsatzraten zwischen 87 und 97 % aufweisen und damit ausgerüstete Motoren die Standards der TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) erreichen. Allerdings zeigte sich auch, dass bereits geringe Konzentrationen von Schwefeldioxid zu einer raschen Deaktivierung der Katalysatoren führen und damit die Einhaltung der Grenzwerte gefährden.

3.3 STICKOXIDMINDERUNG BEI TIEFEN TEMPERATUREN

Der hohen Effizienz von Dieselmotoren und mager betriebenen Ottomotoren steht eine erhöhte Stickoxidbildung entgegen. Dies kann durch heutige Abgasnachbehandlungstechnik, bestehend aus NO_x-Speicher- und SCR-System, ausgeglichen werden. Allerdings stößt diese bei tiefen Temperaturen, wie sie nach einem Motor-Kaltstart auftreten, an Grenzen. Deshalb wurde innerhalb des FVV-Vorhabens „Tief Temperatur DeNO_x“ [5] gezielt nach Alternativen zu

den heute kommerziell verfügbaren Systemen gesucht. Die in einer aufwändigen Literatur- und Patentrecherche gefundenen 26 Systeme wurden anschließend detailliert beschrieben, geclustert und bewertet, wobei die Bewertungsmatrix auch die CO₂-Bilanz berücksichtigte. Die am Labor für Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlung der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg durchgeführte Studie zeigt, dass keines der Systeme geeignet ist, die heutige Serientechnik zu ersetzen. Allerdings weisen einige Systeme das Potenzial auf, als ergänzendes System gezielt zur Verringerung der Stickoxidemissionen bei tiefen Temperaturen eingesetzt zu werden.

4 AUSBLICK

Wissenschaftliche Forschung beantwortet nicht nur Fragen, sondern wirft kontinuierlich weitere Fragen auf. So ist zu erkennen, dass insgesamt für alle dynamisch betriebenen Verbrennungsmotoren das Abgasverhalten im realen Einsatz immer wichtiger wird. Dabei stellt insbesondere die Konvertierung von Schadstoffen in kaltem Abgas eine zentrale Herausforderung dar. Unerheblich ist dabei, ob der geringe Wärme- und damit Energieeintrag in die Abgasanlage durch höhere elektrische Fahranteile oder einen Kaltstart verursacht sind. Zudem bleibt die Katalysatoralterung vor dem Hintergrund der Diskussion über neue Kraftstoffe ein wichtiger Forschungsgegenstand. Die

FVV bereitet daher weitere Forschungsvorhaben vor, die sich explizit diesem Themenkreis widmen.

LITERATURHINWEISE

- [1] IGF-Forschungsvorhaben "Darstellung der zukünftigen Randbedingungen (chemisch/thermo-hydraulisch) zur Auslegung der Abgasnachbehandlung in Antriebssträngen 2025+". Fördergeber: FVV (1206). Projektleitung: Dr.-Ing. Uwe Zink (BASF Catalysts Germany GmbH), Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr. techn. Christian Beidl (Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe, TU Darmstadt). In: FVV (Hrsg.), Frühjahrstagung 2018, Tagungsband R582, S. 175-206, Frankfurt am Main, 2018
- [2] IGF-Forschungsvorhaben "Thermodynamische und chemische Randbedingungen für die Entwicklung von Abgasnachbehandlungssystemen von Nutzfahrzeugen und Maschinen in 2030+". Fördergeber: FVV (1294). Projektleitung: Dr.-Ing. Uwe Zink (BASF Catalysts Germany GmbH), Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger (Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, RWTH Aachen). Laufzeit: 01.02.2018 - 31.01.2020
- [3] IGF-Forschungsvorhaben "Methan-Oxidations-Katalysatoren: Einfluss von Katalysatorzusammensetzung, Druck und Gaszusammensetzung auf Aktivität, Alterung und Reaktivierung". Fördergeber: BMWi/AiF/CORNET (128 EN). Projektleitung: Dr.-Ing. Christian Breuer (Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG), Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr. Olaf Deutschmann und Prof. Dr. Jan-Dierk Grunwaldt (Institut für Technische Chemie und Polymerchemie, KIT Karlsruhe). In: FVV (Hrsg.), Frühjahrstagung 2017, Tagungsband R578, S. 163-207, Frankfurt am Main, 2017
- [4] IGF-Forschungsvorhaben "Formaldehyd". Fördergeber: FVV (1187). Projektleitung: Heinrich Baas (Caterpillar Energy Solutions GmbH), Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister (Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, TU München) und Prof. Dr. Olaf Deutschmann und Prof. Dr. Jan-Dierk Grunwaldt (Institut für Technische Chemie und Polymerchemie, KIT Karlsruhe). In: FVV (Hrsg.), Herbsttagung 2017, Tagungsband R580, S.47-87, Frankfurt am Main, 2017
- [5] IGF-Forschungsvorhaben "Bewertung von verschiedenen Methoden zur Verbesserung des Tief Temperatur DeNO_x-Umsatzes unter Berücksichtigung der CO₂-Bilanz". Fördergeber: FVV (1209). Projektleitung: Lisa Zimmermann (Eberspächer Exhaust Technology GmbH & Co. KG) und Dr.-Ing. Martina Reichert (FORD Forschungszentrum Aachen GmbH), Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Rabl (Labor Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlung, OTH Regensburg). In: FVV (Hrsg.), Frühjahrstagung 2017, Tagungsband R578, S. 209-242, Frankfurt am Main, 2017

DANKE

Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. dankt den öffentlichen Fördergebern und allen FVV-Mitgliedern für die großzügige Unterstützung der in diesem Beitrag genannten Forschungsvorhaben. Unser besonderer Dank gilt den Forschungsstellen, Projektleitern und Mitgliedern der Arbeitskreise und projektbegleitenden Ausschüsse für die vertrauensvolle und gute Zusammenarbeit.