

Zero-Impact-Emissions – Forschung für eine neue Generation Verbrennungsmotoren

Die bisherige Betrachtung des Abgasniveaus von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor konzentrierte sich allein auf deren Schadstoffausstoß. Bei dem Ansatz „Zero-Impact-Emissions“ bildet die Immission, also die gemessene Schadstoffkonzentration in der Umgebungsluft, die Bewertungsgrundlage für das Abgasniveau. Durch mehrere Vorhaben baut die FVV die vorwettbewerbliche Forschung aus und schafft die Grundlagen für die Entwicklung von „Zero-Impact-Vehicles“, deren Emissionen keine Auswirkungen auf die Luftqualität haben.

1 ZERO-IMPACT-VEHICLES

Der Schadstoffausstoß von Fahrzeugen wurde im Laufe der letzten Jahrzehnte bereits erheblich reduziert. Bei der Festlegung neuer Emissionsgrenzwerte definierte die Legislative dabei zunächst neue Werte für die maximal zulässigen Immissionen in der Umgebung der Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen (VKM). Hierzu wurde die Schadstoffkonzentration an bestimmten Orten zu bestimmten Zeiten gemessen, aus





© FEV

STIMMEN AUS DER FVV



© APL

Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirsten leitet den Bereich Vorentwicklung und Innovation bei der APL Group und ist in der FVV in verschiedenen Funktionen aktiv.

„Ein Zero-Impact-Powertrain kann den Lösungsraum für eine nachhaltige und emissionsarme Mobilität von Personen und Gütern erweitern beziehungsweise sicherstellen.“



© Purem

Philipp Weinmann, M. Sc., ist Experte für Emissionen bei der Purem GmbH. Er koordiniert das FVV-Forschungsvorhaben zur Partikelbildung durch HWL-Injektion in SCR-Systeme.

„Durch ein verbessertes Verständnis der Vorgänge bei der Abgasnachbehandlung können Emissionen weiter reduziert werden, wodurch sich auch deren Einfluss auf Menschen und Umwelt deutlich verringern lässt.“



© IAV

Dr.-Ing. Frank Bunar ist Senior Technical Consultant Powertrain Calibration & Technology bei der IAV GmbH. Er koordiniert das FVV-Forschungsprojekt zu Antriebssträngen mit Zero-Impact-Endrohremissionen.

„Hybridantriebe sind wettbewerbsfähig, nutzerfreundlich und mit E-Fuels klimafreundlich. In einem Zero-Impact-Vehicle ergänzen sich Verbrennungs- und Elektromotor mit ihren Stärken hierbei hervorragend.“



© ITNA

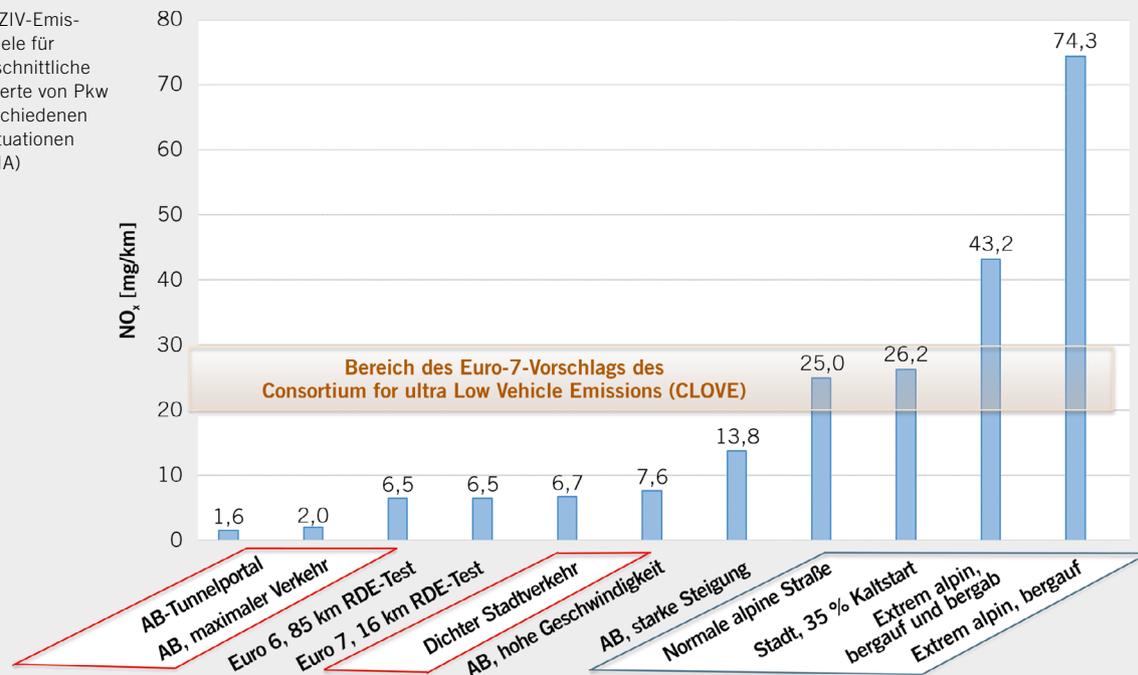
Ao. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Hausberger ist Leiter des Forschungsbereichs Emissionen am Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme (ITNA) der Technischen Universität Graz. Mit seinem Team hat er die Studie über Zero-Impact-Fahrzeugemissionen federführend erarbeitet.

„Pkw und Nfz mit Zero-Impact-Schadstoffemissionen sind machbar, Euro 7 wird vermutlich schon in diesem Bereich sein.“



Science for a moving society

BILD 1 ZIV-Emissionsziele für durchschnittliche NO_x-Werte von Pkw in verschiedenen Fahrsituationen (© ITNA)



- Fahrsituationen mit hohem täglichem Verkehrsaufkommen erfordern niedrige Milligrammwerte pro gefahrenem Kilometer, haben aber „einfache“ Fahrbedingungen.
- Anspruchsvolle Fahrsituationen sind mit geringerem Verkehrsaufkommen verbunden und erlauben niedrige Milligrammwerte pro gefahrenem Kilometer.

der strengere Emissionsgrenzwerte und umfassendere Prüfverfahren für Fahrzeuge und andere Schadstoffversauerer wie Heizungen und Industrieanlagen abgeleitet wurden, um die Luftqualitätsziele nicht zu verfehlen. Oftmals korrelierten die vorgegebenen Emissionen und der erhoffte Effekt für die Umgebungsluftqualität

jedoch nicht unter allen Bedingungen miteinander, sodass die Emissionsgrenzwerte im Laufe der Jahre immer weiter gesenkt wurden.

Um eine wirksame Zielvorgabe zur Vermeidung schädlicher Umweltauswirkungen zu ermitteln, hat die FVV die Betrachtung der Fahrzeugabgasemissionen um deren situationsabhän-

giges Immissionspotenzial erweitert. Beim Ansatz der „Zero-Impact-Emissions“ (ZIE) bilden, anders als beim alten Vorgehen, die gemessenen Konzentrationen in der Luft die Bewertungsgrundlage für das Schadstoffniveau. Ein „Zero-Impact-Vehicle“ (ZIV) ist in diesem Kontext ein Fahrzeug, dessen Abgasemissionen so gering ausfallen, dass es in keiner Fahrsituation messbare negative Auswirkungen auf die Umwelt und die Luftqualität hat.

TABELLE 1 Verkehrs- beziehungsweise Fahrsituationen für die Untersuchung im Rahmen des Projekts „Zero-Impact-Endrohremission-Antriebsstränge“ (© TME)

	Grundsituation	Besonderheiten zur Betrachtung von Emissionen
1	Neckartor in Stuttgart	Jährliches Mittel
2	Neckartor in Stuttgart	Stoßverkehr im Winter mit maximal möglichem Verkehrsaufkommen
3	Überlandautobahn	Dichter Verkehr auf achtspuriger Strecke im Winter als Orientierung für maximalen Autobahnverkehr in Deutschland
4	Stadtautobahn	Hohes Verkehrsaufkommen
5	Brennerautobahn	Autobahnfahrt im Gebirge als Orientierung für die maximale Verkehrsmenge, gemessen an einem Tag in 2020
6	Parkplatzverkehr	Hohe Kaltstartanteile, Rangieren, geringe Geschwindigkeit
7	Hochgebirgsstraße	Passfahrt

2 KONZEPTIONELLE STUDIE

Um eine Grundlage für ZIE-/ZIV-Forschungsaktivitäten zu schaffen und ihr Ziel zu definieren, wurden zunächst im Rahmen der konzeptionellen Studie „Zero-Impact Fahrzeug-Emissionen“ die Anforderungen beschrieben, die ein ZIV erfüllen müsste [1]. Die Umsetzung des aus FVV-Eigenmitteln finanzierten Vorhabens erfolgte bei der Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermody-

namik (FVT) in Graz, dem Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme (ITNA) der TU Graz und Aviso in Aachen.

Wie eine Literaturrecherche zu Beginn der Arbeiten ergab, lässt sich eine exakte Grenze der Schadstoffkonzentration, ab der keine negativen Auswirkungen auftreten, nicht mit Sicherheit festlegen. Nach einem Benchmarking zur Definition von Emissionsgrenzwerten für ein ZIV wählte das Forscherteam den anspruchsvollsten Maßstab, das sogenannte 3%-Irrelevanzkriterium, für die Studie aus. Der Anteil des Straßenverkehrs an den Immissionen muss demnach als irrelevant einzuordnen sein, das heißt, er darf maximal 3 % zu der lokal zulässigen gesamten Immissionsbelastung beitragen. In der Studie entspricht dies dem Beitrag der Summe aller Pkw und Nfz mit Verbrennungsmotor, die im relevanten Umfeld einer Immissionsmessstelle unterwegs sind. Zudem definierte das Forscherteam die Messstelle Neckartor in Stuttgart als typischen hochbelasteten Referenzstandort. Dort wurden in der Vergangenheit regelmäßig besonders hohe Schadstoffwerte gemessen. Anhand dieser Daten wurde berechnet, welche Emissionen pro Fahrzeugkilometer im Umkreis des Neckartors maximal ausgestoßen werden dürfen, damit die Immissionen unterhalb des 3%-Limits bleiben. Diese Untersuchungen wurden dann mit den Messdaten von anderen, deutschlandweit repräsentativ verteilten Standorten wiederholt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Anforderungen an ein ZIV je nach Fahrsituation sowie Umweltbedingungen stark differieren. An Orten mit hohem Verkehrsaufkommen emittieren viele Fahrzeuge Schadstoffe, dementsprechend ist ein niedriges Emissionsniveau pro Fahrzeugkilometer erforderlich, um die Vorgaben für das 3%-Ziel einzuhalten. Allerdings herrschen an diesen Stellen in der Regel keine besonders anspruchsvollen Fahrbedingungen bezogen auf das Emissionspotenzial, sodass die Emissionsgrenzen dort leichter einzuhalten sind. Extreme Fahrbedingungen, etwa das Beschleunigen und Fahren mit hoher Geschwindigkeit, sind nur bei geringem Verkehrsaufkommen möglich, das heißt in diesen Situationen sind weniger Fahrzeuge gleichzeitig unterwegs und stoßen Emissionen aus.

Am kritischsten für die Erreichung des „Zero-Impact“-Ziels sind dichter Stadt- oder Autobahn(AB)-Verkehr, **BILD 1**. Daraus leiten die Forschenden ab, dass sich künftige Real-Driving-Emission(RDE)-Prüfverfahren auf die Einhaltung der Emissionsvorgaben im dichten Stadt- und Autobahnverkehr konzentrieren und diese Situationen mit angemessenen Grenzwerten abgeprüft werden sollten. Auch Extremsituationen wie Bergauffahrten in tendenziell weniger dichtem Verkehr mit anderen Grenzwerten zu belegen, ist sinnvoll, da der Spielraum für Emissionen pro Fahrzeugkilometer für diese Situationen viel größer ist als für den dichten Stadtverkehr [2].

3 ZIE-ANTRIEBSSTRÄNGE

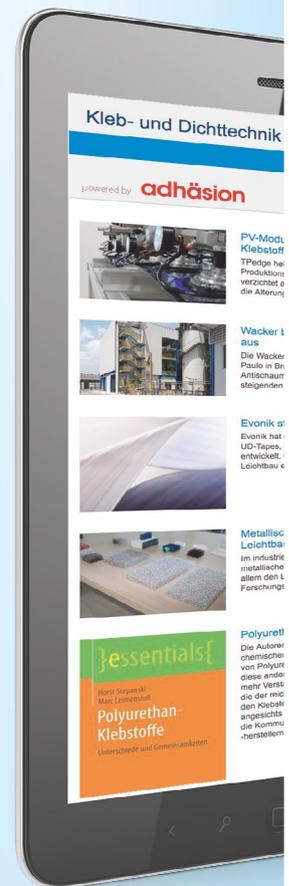
Auf der konzeptionellen Studie aufbauend wurde am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen im Rahmen des Forschungsprojekts „Zero-Impact-Endrohrmission-Antriebsstränge“ untersucht, mit welchen Abgasnachbehandlungskonzepten künftige Fahrzeuge die ZIE-Grenze erfüllen können [3]. Ausgehend von den definierten Grundscenarien aus dem Projekt „Zero-Impact Fahrzeug-Emissionen“ haben die Arbeitsteams beider Projekte sieben konkrete Verkehrs- beziehungsweise Fahrsituationen identifiziert, bei denen herausfordernde Fahrbedingungen mit ungünstigen Immissionsaspekten kombiniert sind, zum Beispiel hohes Verkehrsaufkommen und intensive Bebauung wie am Neckartor in Stuttgart, **TABELLE 1**. Für diese Situationen wurden die pro Fahrzeug maximal zulässigen Endrohrmissionen als neuer Grenzwert zugrunde gelegt. Wenn das Fahrzeug das jeweilige Emissionslimit in allen der identifizierten kritischen Zyklen erfüllt, dann wird Zero-Impact auch in weniger kritischen Situationen erreicht.

Für jede der Grenzbetrachtungsszenarien wurde eine Simulationsanalyse mit zwei Referenzfahrzeugen durchgeführt. Dafür wurden ein Mittelklasse-Pkw mit Ottomotor und ein leichtes Nfz (Transporter) mit Dieselmotor herangezogen. Beide Fahrzeuge erfüllen die Vorgaben der aktuellen Emissionsrichtlinie Euro 6d.

In den Szenarien 5 und 7 in **TABELLE 1** ließ sich die ZIE-Konformität aufgrund des moderaten Verkehrsaufkommens

BRANCHEN- VERBUNDEN

Der neue Newsletter
„Kleb- und Dicht-
technik“ von **adhäsion**

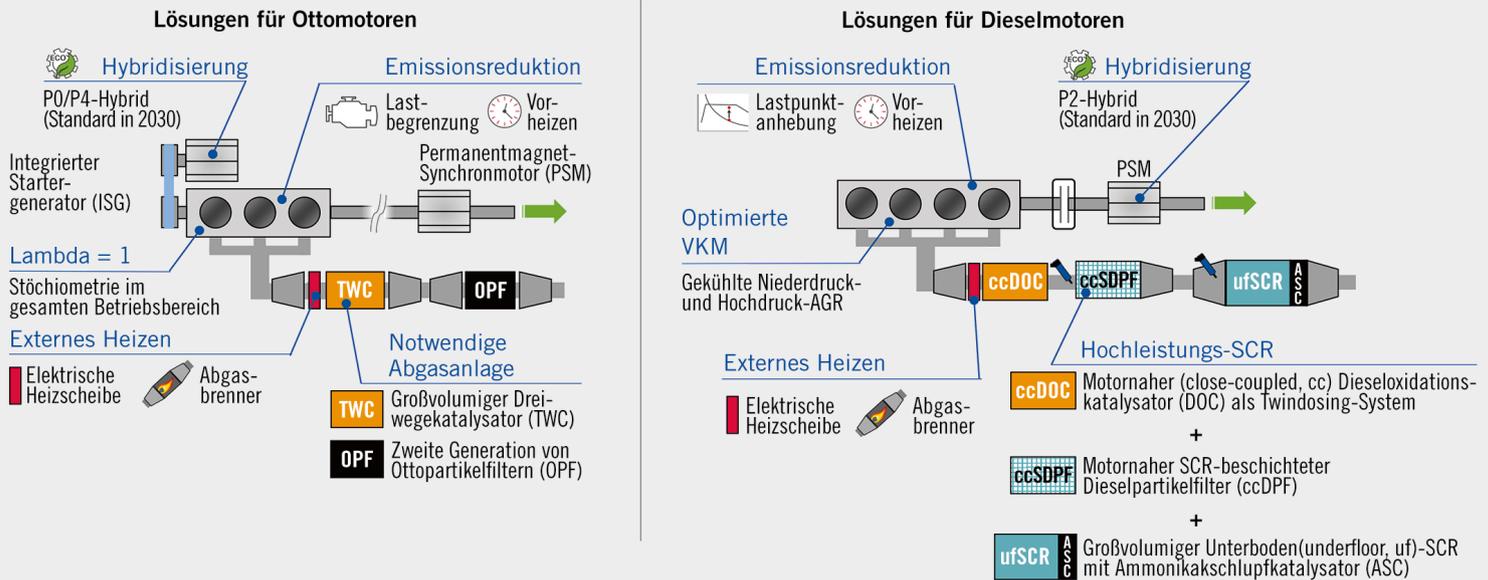


Alle Top-News und Branchen-Highlights aus der Welt der Kleb- und Dichttechnik, regelmäßig in Ihrem Postfach: Bestellen Sie jetzt unseren kostenlosen adhäsion-Newsletter.

Jetzt registrieren:
[www.springerprofessional.de/
mynewsletters](http://www.springerprofessional.de/mynewsletters)

adhäsion KLEB+
DICHTEN

BILD 2 Maßnahmen zur Erfüllung der ZIV-Anforderungen bei Ottomotoren (links) und Dieselmotoren (rechts) (© TME)



und der geringen Kaltstartanteile sowohl mit Otto- als auch mit Dieselmotor bereits mit aktueller Technik für Euro 6 nachweisen. Herausfordernd für beide Motorkonzepte waren extreme Stadt-fahrtszenarien mit hohen Kaltstartanteilen, längeren Start-Stopp-Phasen und kurzen Fahrstrecken sowie Auto-bahnfahrten mit erhöhter Motorlast. Als Ausgangsbasis für die weiteren Arbeiten legte das Forscherteam überarbeitete, auf die Emissions- und CO₂-Anforderungen der Zeit nach 2030 optimierte Otto- und Diesel-Antriebsstränge zugrunde. Beim Ottomotor waren dies eine Lambda-1-Verbrennung im gesamten Kenn-feldbereich, Motordownsizing unter Beibehaltung des aktuellen Katvo-lumens, ein Partikelfilter sowie eine P0/P4-Mildhybridisierung (48 V). Im Dieselantriebsstrang wurde eine P2-Mildhybridisierung (48 V) imple-mentiert. Hybridtechnik mit dem Pri-märziel der Systemeffizienzsteigerung wurde hier also auch synergetisch zur Schadstoffreduktion genutzt.

Zur Optimierung des Emissionsverhaltens bei Kaltstart sowohl beim Otto- als auch beim Dieselmotor kann ein elektrisch beheizter Katalysator integriert werden. Dieser ermöglicht ein schnelles Aufheizen des Abgasnach-

behandlungssystems auf Betriebstemperatur – allerdings bedarf es entweder vor der Fahrt oder während des rein elektrischen Anfahrens einer Vorwärmung, um das volle Reduktionspotenzial zu ermöglichen [4]. Alternativ kann der Einsatz eines Kraftstoffbrenners sinnvoll sein, der die thermische Energie vollständig nutzt, um das Abgas-system zu beheizen. Beim Dieselmotor bieten sich darüber hinaus motorbezo-gene Maßnahmen an, wie erhöhte AGR-Raten, optimierte Einspritzmuster und -timings, eine Leistungsbegrenzung sowie eine Lastpunktverschiebung mit-hilfe des Elektromotors. Teilweise lässt sich damit auch die Aufheizdauer der Abgasnachbehandlungskomponenten gezielt reduzieren. Für beide Motor-konzepte ist die Wahl einer geeigneten Betriebsstrategie, das heißt die Begren-zung der maximalen Motorlast zu Beginn der Fahrt, eine kosteneffiziente Methode zur Emissionsreduzierung. Allerdings ist zu beachten, dass dies für die Fahrerin beziehungsweise den Fahrer durch eine Leistungsbegrenzung spürbar ist.

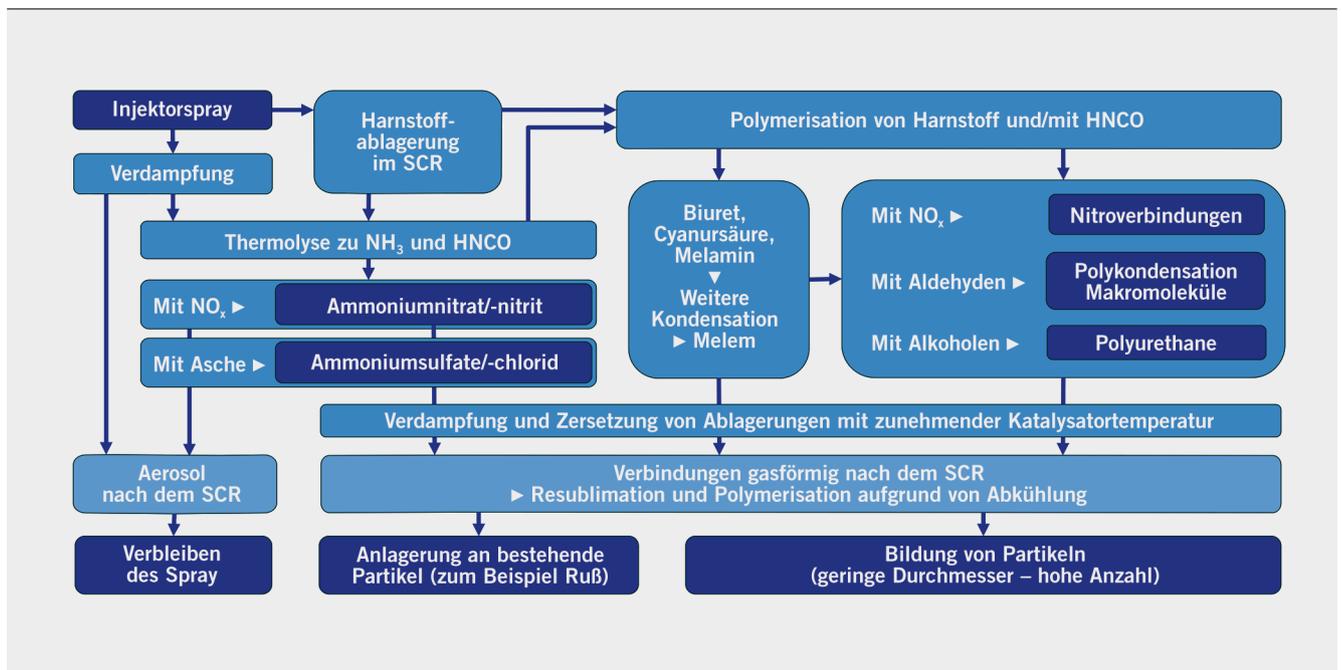
Zur Emissionsminderung bei Hoch-lastzyklen, zum Beispiel während Auto-bahnfahrten, wirkt sich beim Ottomotor eine Vergrößerung des Katalysatorvolu-mens vorteilhaft auf die Reinigungswir-

kung aus. Um eine Sauerstoffüberflutung und Sättigung des Katalysators zu ver-meiden, kann ein variabler Ventiltrieb eingesetzt werden, der die Auslassventile in solchen Betriebspunkten geschlossen hält. Bei einem Dieselmotor bietet der Einsatz eines Systems für die selektive katalytische Reaktion (Selective Catalytic Reduction, SCR) aus einem motornahen Unterbodenkatalysator und einem Twin-dosing-System hohes Potenzial zur Emis-sionsreduzierung im warmen Betriebs-zustand. Die möglichen Maßnahmen für den Otto- und Dieselmotor zur Erfüllung der ZIV-Anforderungen sind in **BILD 2** zusammengefasst.

4 KOMPONENTENBEZOGENE EMISSIONSFORSCHUNG

Bei der Einspritzung von Harnstoff-Wasser-Lösung (HWL), auch als AdBlue bekannt, können sich im Abgastrakt für den SCR-Katalysator Partikel bilden. Das Forschungsprojekt „Partikelbildung unter HWL-Einspritzung“ soll einen zusätzlichen Detailgrad über die spezi-fischen Emissionsbildungsmechanismen liefern [5]. Durch das immer weiter abge-senkte Schadstoffniveau der Verbren-nungsmotoren treten verstärkt Phäno-mene zutage, die vorher maskiert wur-den und nicht separat messbar waren.

BILD 3 Theoretische Partikelbildungspfade durch Einspritzung von HWL (© RWTH)



Der genaue Entstehungsprozess der teils sehr kleinen Partikel aus der HWL-Einspritzung ist jedoch noch nicht geklärt. Im Rahmen des durch die FVV finanzierten Forschungsvorhabens, durchgeführt vom TME und vom Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin (IASU) des Universitätsklinikums Aachen, sollen die Partikelbildung und zudem die Emissionsrelevanz (Anzahl, Größenverteilung und Zusammensetzung) untersucht werden, um daraus Hinweise für künftige Entwicklungen zur Emissionsreduzierung für ZIVs aufzugreifen. **BILD 3** zeigt mögliche chemische Prozesse zur Anlagerung an vorhandene Partikel oder Partikelneubildungen unter HWL-Einspritzung.

Der Ansatz des Projekts ist in zwei große Arbeitspakete unterteilt. Das erste Paket konzentriert sich auf die Online-Partikelmessungen am Motorprüfstand und auf die Partikelbeprobung. Hierfür werden ein Diesel- und ein Wasserstoffmotor verwendet. Parallel soll das zweite Paket tiefere Einblicke durch detaillierte chemische Analysen der Proben und durch die Zusammenfassung aller Ergebnisse in einem beschreibenden Modell liefern. Beide Pakete zielen auf realistische Versuchsaufbauten ab, die einen direkten Transfer ermöglichen: Erste Ergebnisse sind noch in 2023 zu erwarten,

sodass diese unmittelbar in die Abgasstrang- und Komponentenentwicklung für die nächsten Emissionsstufen einfließen können.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Die FVV verfolgt bei ihren Forschungsaktivitäten grundsätzlich einen technologieneutralen Ansatz. Wie die Forschungsergebnisse belegen, bieten Verbrennungsmotoren in diesem Kontext noch erhebliches Potenzial. Den Mitgliedsunternehmen soll die freie Wahl überlassen werden, für welches Antriebskonzept sie sich entscheiden. Die Grundtechnologien für die Umsetzung eines ZIVs sind bereits vorhanden. Bei weiteren Aktivitäten geht es vor allem darum, diese Technologien so einzusetzen, dass sich alle Potenziale entfalten. Dazu leistet die FVV, in der Hersteller, Zulieferer und Entwicklungsdienstleister gemeinsam und vorwettbewerblich mit Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten, einen entscheidenden Beitrag.

LITERATURHINWEISE

[1] FVV-Forschungsvorhaben „Zero-Impact Fahrzeug-Emissionen“. Fördergeber: FVV (1407). Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirsten (APL GmbH). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Helmut Eichlseder (TU Graz). In: FVV (Hrsg.):

Tagungsband R602, S. 79-96, Frankfurt am Main, 2022

[2] Hausberger, S.; Uhrner, U.; Stadlhofer, W.; Toenges-Schuller, C.; Schneider, C.: Zero-Impact-Fahrzeuge. 31. Aachen Kolloquium Sustainable Mobility, Aachen, 2022

[3] FVV-Forschungsvorhaben „Zero-Impact-Endrohremission-Antriebsstränge“. Fördergeber: FVV (1412). Projektleitung: Dr.-Ing. Frank Bunar (IAV GmbH). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger (RWTH Aachen). (Unveröffentlicht)

[4] Maurer, R.; Yadla, S.; Balazs, A.; Thewes, M.; Walter, V.; Uhlmann, T.: Designing Zero Impact Emission Vehicle Concepts. Experten-Forum Powertrain: Ladungswechsel und Emissionierung, Hanau, 2020

[5] FVV-Forschungsvorhaben „Partikelbildung unter HWL-Einspritzung“. Fördergeber: FVV (1464). Projektleitung: Philipp Weinmann, M. Sc. (Purem GmbH). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger (RWTH Aachen), Univ.-Prof. Dr. med. Thomas Kraus (Universitätsklinikum Aachen). (Unveröffentlicht)



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.mtz-worldwide.com