Aktuelle WKM Stellungnahme

Februar 2024

Technische Erläuterungen anlässlich
gerichtlicher Verfahren im Zusammenhang
mit dieselmotorischen PKW-Antrieben

WKM

Wissenschaftliche Gesellschaft
für Kraftfahrzeug- und Motorentechnik e.V.

Einleitung und Motivation

Aufgrund aktueller Gerichtsurteile zur Rechtmäßigkeit dieselmotorischer Technologielösungen publiziert die Wissenschaftliche Gesellschaft für Kraftfahrzeug- und Motorentechnik e.V. WKM diese Stellungnahme insbesondere für die fachinteressierte Öffentlichkeit.

Die WKM hat in ihrem Positionspapier im Juni 2017 die Nutzung einer sogenannten Zykluserkennung mitsamt Kennfeldumschaltung und Grenzwertverletzung, wie sie bei dieselmotorischen Anwendungen teilweise zum Einsatz kam, deutlich kritisiert. Eine Zykluserkennung mitsamt Kennfeldumschaltung unterscheidet zwischen dem Fahrzeugzustand im Normalbetrieb auf der Straße und einem Betrieb im Prüfstandmodus. Dabei hielt der Modus "Normalbetrieb auf der Straße" auf dem Prüfstand die gesetzlichen Grenzwerte nicht ein. Solche technischen Manipulationen zur Einstellung spezieller, im Realbetrieb nicht aktiver Emissionsminderungsmaßnahmen hat die WKM scharf verurteilt [1]. Die WKM hat deshalb die behördlichen Anweisungen zur aufwändigen Überarbeitung der relevanten Motorsteuerungen betroffener Fahrzeuge ausdrücklich begrüßt.

Diese überarbeiteten Motorsteuerungen wurden mittlerweile flächendeckend eingeführt. Jedoch sind diese trotz Überarbeitungen, Emissionsverbesserungen und Eliminierung der unerlaubten Umschaltungen, ebenso wie Betriebsstrategien im Allgemeinen weiterhin Gegenstand laufender gerichtlicher Auseinandersetzungen.

Insbesondere geht es in zahlreichen Verfahren um die Rechtmäßigkeit einer temperaturabhängigen Reduzierung der Abgasrückführrate bei niedrigen Außentemperaturen. Für diesen Sachverhalt wird oftmals die Begrifflichkeit der "Verwendung von Thermofenstern" angeführt. Die existierenden Urteile und anhängigen Verfahren betreffen vor allem EURO5 Fahrzeuge der Jahrgänge 2008 bis 2014, die kurz nach der Jahrtausendwende entwickelt wurden. Weitere Fahrzeugjahrgänge bis nach 2017 mit einer EURO6 Zertifizierung können ebenfalls betroffen sein.

Im Zuge laufender Gerichtsverfahren sind jedoch in Teilen technisch nicht substantiierte, teilweise falsche, widersprüchliche und mit dem Stand der Technik und des Wissens nicht kompatible Aussagen und Behauptungen kommuniziert worden. So verletzen auch Gerichtsurteile teilweise in ihren zugrundeliegenden Annahmen wesentliche physikalische, chemische, ingenieurstechnische und weitere wissenschaftliche Grundsätze. Die Berücksichtigung dieser zwingenden Grundsätze ist unabdingbar, um einen reibungslosen Motorbetrieb überhaupt zu ermöglichen, um Verbraucherschutzanforderungen zu erfüllen, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten und um Leib und Leben zu schützen. Auch Gerichte müssen diese Grundsätze berücksichtigen, weil sie sonst in ihren Urteilen von falschen Annahmen ausgehen.

Aus diesem Grund publiziert die WKM zusammen mit Vertretern zahlreicher Hochschulen diese fachliche Stellungnahme, die sich in folgende Kapitel unterteilt:

1. Notwendigkeit einer ganzheitlichen Entwicklung eines Fahrzeuges
2. Keine Lösung der temperaturabhängigen Abgasrückführung durch eine Katalysatornachrüstung
3. Allgemeiner Stand des Wissens und Informationsstand im Entwicklungszeitraum der EURO5 Technologie
4. Immissionskonzentrationen am Beispiel NO_2

Nach den vier Hauptkapiteln mit technischen Erläuterungen auf den Seiten 5-11 folgt ein Literaturverzeichnis auf den Seiten 12-37. Wichtige ergänzende Erläuterungen finden sich im Anhang auf den Seiten 38-45.

Zusammenfassung

Der Dieselmotor als PKW-Antrieb wurde in den 1990er und 2000er Jahren zu einer Technologie mit signifikanten Verbrauchsvorteilen im Vergleich mit anderen Antriebskonzepten weiterentwickelt, was die niedrigsten CO_2-Flottenemissionen der EU im Vergleich mit den weltweiten Hauptmärkten ermöglichte [2–4]. Dieser CO_2-Emissionsvorteil wurde konsequenterweise von der europäischen Politik auch nach den 2000er Jahren unterstützt [5–9]. Die größte technische Herausforderung war die Reduktion der NO_x-Emissionen im Realbetrieb unter Berücksichtigung aller Auswirkungen. Die Öffentlichkeit, die Politik und selbst fachinteressierte Personen können nicht immer die Aufwände zur Absicherung der Technologie für den Anwendungsfall einer Großserie einschätzen. Die Darstellung dieses Aufwandes ist eine Motivation für diese WKM Stellungnahme.

Für die Entwicklung war und ist es generell zwingend notwendig, die Technologie für einen großen Volumenmarkt mit unterschiedlichsten Nutzungsprofilen sorgfältig und umfassend abzusichern. Entsprechend wurden und werden neue Technologien schrittweise in die Großserie eingeführt. Für die gegenständliche EURO5 Fahrzeuggeneration (Entwicklung ca. 2002-2009, Verkauf ca. 2008-2014) wurde insbesondere der Dieselpartikelfilter DPF für alle Fahrzeuge serienmäßig verbaut. Für die innermotorische NO_x-Reduktion kam in diesen Fahrzeugen typischerweise die gekühlte Hochdruckabgasrückführung HD-AGR zum Einsatz. Die gekühlte HD-AGR und alle damaligen alternativen Technologieansätze waren ausnahmslos temperaturabhängig[1]. Die besondere Herausforderung lag und liegt in der Beherrschung der vielfältigen Wechselwirkungen im Gesamtsystem Grundmotor, Air-Management, Abgasnachbehandlung, Fahrzeugantrieb, Fahrzeugkühlung und Gesamtfahrzeug unter Berücksichtigung aller möglichen Einsatzbedingungen. Höchstes Ziel neben der Betriebssicherheit ist explizit der bestmögliche Schutz von Leib und Leben [10–13].

Voraussetzung für die technologische Weiterentwicklung war insbesondere ein bahnbrechendes Voranschreiten neuer Entwicklungsmethoden in Verbindung mit modernsten Motorsteuerungen, die in ihrer konsequenten Weiterführung den überzeugenden Technologiestand heutiger Motoren ermöglicht haben [14, 15].

Vor diesem Hintergrund sind die Kernaussagen der vier Kapitel dieser technischen Stellungnahme zur Bewertung von Aussagen im Zusammenhang mit dieselmotorischen Rechtsverfahren nachfolgend zusammengefasst:

1. Es besteht eine unmittelbare, technisch nicht bestreitbare und im Entwicklungsprozess ausnahmslos zu berücksichtigende Wechselwirkung zwischen der dieselmotorischen Motorapplikation und dem motorischen und fahrzeugseitigen Gesamtsystem inklusive der Absicherung des DPF (S. 5-6, 43). Eine Rechtsprechung, welche diese Wechselwirkung nicht berücksichtigt, verstößt in ihrer Konsequenz gegen naturwis-

[1] Neben der klassischen gekühlten HD-AGR war die ungekühlte HD-AGR mit erweitertem Betriebsbereich bei niedrigen Temperaturen eine Alternative, jedoch mit zugleich erhöhten NO_x-Emissionen aufgrund der deutlich erhöhten AGR-Temperatur. Auch die Niederdruck-AGR ist an sich besonders temperaturabhängig und erfordert typischerweise bei niedrigeren Ladelufttemperaturen eine Korrektur. Sowohl NO_x-Speicherkatalysatoren als auch SCR-Systeme ändern nichts an dem technischen Erfordernis der temperaturabhängigen AGR. Auch für diese gilt: Alle verschiedenen Systeme weisen unterschiedlich ausgeprägte, aber ausnahmslos immer vorhandene Temperaturabhängigkeiten auf. Technisch lassen sich die Temperaturabhängigkeiten durch Ladeluftkühlkonzepte reduzieren. Entsprechend neue Ladeluftkühlkonzepte wurden in Dieselmotoren schrittweise circa ab 2012 eingeführt.

senschaftliche und ingenieurtechnische Fakten, gegen physikalisch-chemische Gesetzmäßigkeiten und letztendlich gegen die ethischen Grundsätze des Ingenieurs und führt zu einer Gefahr für Leib und Leben [10–13].

Heutige Emissionstechnologien mit einer deutlich temperaturunabhängigeren AGR sind das Ergebnis kontinuierlicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und waren im Zeitfenster der EURO5 Entwicklung nicht vorhanden und nicht einsatzfähig. Wird die damals notwendige Temperaturabhängigkeit heute für unzulässig gewertet, bedeutet dies faktisch ein generelles, nachträgliches und rückwirkendes Verbot einer ursprünglich akzeptierten Dieseltechnologie.

2. SCR Systeme waren für die PKW-Großserie in der EU im EURO5 Betrachtungszeitraum bis etwa 2011/2012 noch in der Entwicklung. Für jede Getriebe-, Achsantriebs-, Karosserie-, Leistungs- und Emissionsstufenvariation ist eine sehr weitreichende Neuabsicherung unabdingbar (S. 7). Bei ihrer Betriebstemperatur oberhalb von 180-200°C ermöglichen SCR-Katalysatornachrüstungen eine deutliche Verringerung der NO_x-Emissionen. Alle Katalysator-Anlagen benötigen jedoch eine Mindesttemperatur für zufriedenstellende Funktion. Insbesondere bei einer niedrigen Außentemperatur in Kombination mit Stadtbetrieb und niedriger Motorlast erzielen sie deshalb eine geringe Wirkung oder können sogar wirkungslos sein. Zuverlässige Katalysatorheizmaßnahmen waren Gegenstand von umfassenden Forschungsmaßnahmen und wurden in den Folgejahren eingeführt. Dies war Voraussetzung für niedrigste Emissionen, die heutige Systeme erreichen. Auf mannigfaltige Herausforderungen und die Notwendigkeit einer vollständig in das Gesamtsystem integrierten Implementierung und Absicherung wurde ausreichend hingewiesen [16, 17]. Auch mit Einsatz einer SCR-Technologie ist aus ingenieurtechnischer Sicht eine temperaturabhängige AGR- und Emissions-Regelung zwingend erforderlich, bekannt und umfassend dokumentiert [18]. Ferner ist es nicht zulässig, den heutigen Wissensstand vollintegrierter Abgasnachbehandlungssysteme auf den EURO5 Entwicklungsstand von ca. 2005-2009 zu übertragen.

3. Die im Realbetrieb erhöhten NO_x-Emissionen, die von den Messwerten bei Zertifizierungsrandbedingungen deutlich abweichen, waren im Zeitraum von 2005 bis 2013 Vertretern der Legislative und Exekutive auf nationaler und europäischer Ebene umfassend bekannt und wurden aufgrund des Stands der Technik, insbesondere von Testverfahren, von ihnen akzeptiert [S. 8, 39-40]. Auch die bei niedrigen Temperaturen zwangsläufig höheren Emissionen von EURO5/6-Dieselfahrzeugen waren bekannt und wurden auch mit Blick auf die angestrebte Verringerung der CO_2-Flottenemissionen durch den Einsatz der Dieseltechnologie ausdrücklich hingenommen. Das Fehlen von dieselmotorischen Grenzwerten für Realemissionen in den EURO5 Vorgaben führte zu unterschiedlich ausgeprägten Feldlösungen je nach Hersteller mit generell gegenüber dem Prüfstand erhöhten Realemissionen von Stickoxiden. Die WKM hat die Überarbeitung zahlreicher dieselmotorischer Motorsteuerungen mit dem Fokus auf reduzierte NO_x-Emissionen in den letzten Jahren ausdrücklich begrüßt. Mit Blick auf die technischen Grenzen der in EURO5 Fahrzeugen verbauten Technologie lehnt die WKM jedoch die Schlussfolgerung ab, dass der damals erreichte Technologiestand, der Fahrzeuganforderungen und Betriebssicherheitsaspekte berücksichtigt, nicht zulässig sei.

4. Ein wichtiger Bestandteil der laufenden Verfahren ist die Frage der Rechtmäßigkeit erhöhter NO_x-Emissionen bei einer Außentemperatur unterhalb von 10°C, was insbesondere mit Gesundheitsschutz vor allem in Ballungsgebieten untermauert wird. Jedoch unterscheidet sich die NO_2-Konzentration bei niedrigen Temperaturen kaum von der NO_2-Konzentration beispielsweise bei 20°C Außentemperatur (S. 9-11, 41-44). Dies ist seit langem bekannt. Vielmehr ist die NO_2-Stadtluftkonzentration in der kälteren Jahreszeit bei niedrigen Außentemperaturen typischerweise aufgrund einer Überlagerung mehrerer meteorologischer und physikalisch-chemischer Effekte sogar niedriger als bei mittleren und hohen Außentemperaturen.

1. Notwendigkeit einer ganzheitlichen Entwicklung eines Fahrzeuges

Die Entwicklung eines dieselmotorischen Antriebes ist aufgrund der Wechselwirkung von Basistriebwerk, Abgasturbolader, Abgasnachbehandlung, Motor- und Fahrzeugthermomanagement sowie weiterer Fahrzeugbestandteile eine der anspruchsvollsten Aufgabenstellungen in der Energietechnik. Die Subsysteme dieses Gesamtsystems dürfen aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Wechselwirkungen nicht getrennt betrachtet, sondern müssen in der Entwicklung sorgfältig aufeinander abgestimmt werden.

Aus welchem Grund dürfen die dieselmotorischen NO_x-Rohemissionen nicht isoliert betrachtet werden?

Eine der wichtigen dieselmotorischen Herausforderungen war die laufzeitstabile Einführung und der sichere Betrieb des DPF. Die Vermeidung einer zu hohen Rußbeladung im DPF als Ergebnis der intensiven Wechselwirkung der Motorapplikation, der resultierenden Motorrohemissionen und der Wechselwirkung mit der Abgasnachbehandlung unter allen möglichen auftretenden Betriebszuständen war schon im Zeitfenster der EURO5 Fahrzeugentwicklung von ca. 2003 bis 2009 von zentraler Bedeutung. Schadensfälle dokumentieren die Herausforderungen eines sicheren DPF Betriebes. Gerade die temperaturabhängige AGR-Regelung hat einen wichtigen Beitrag zur sicheren Einführung der DPF-Technologie beigesteuert. Dies ist Stand des Fachwissens. Somit werden Folgen bis hin zu einem unerwünschten Fahrzeugbrand und resultierender Gefahr von Leib und Leben weitestgehend vermieden. Unzählige wissenschaftliche Publikationen dokumentieren die generellen Herausforderungen niedriger Ruß- oder NO_x-Emissionen oder geeigneter DPF-Betriebsstrategien [19–280]. Insbesondere die gewünschte kontinuierliche, passive, temperaturabhängige Kohlenstoffoxidation im DPF mit Hilfe des Abgasbestandteils NO_2 funktioniert bei niedrigen Abgastemperaturen deutlich schlechter. Auch dies zwingt bei niedrigen Temperaturen zu einer Reduzierung der Rußrohemissionen des Motors durch ein Schließen des Abgasrückführventils.

Was ist die Konsequenz, wenn die Nutzung eines "Thermofensters", also das Schließen des Abgasrückführventils bei niedriger Temperatur, nicht gestattet wird?

Bei EURO5 Fahrzeugen mit HD-AGR kann ein Entfall des "Thermofensters" zu einem deutlichen Anstieg und einer qualitativen Änderung der Belagsbildungseffekte und in der Folge zu einem Bauteilversagen führen [17]. Unerwünschte lackartige, verklebende oder ähnlich nachteilige Ablagerungen können bewegliche Bauteile wie das Abgasrückführventil blockieren. Diese Blockade kann im geöffneten Zustand des AGR-Ventils passieren. Im nachfolgenden Betrieb wird dem Motor anstelle von Frischluft zu viel rezirkuliertes Abgas durch das blockierte AGR-Ventil zugeführt. Es folgt ein Sauerstoffmangel des Frischgemisches, der zu einem fortschreitenden Anstieg der Rußbildung und einem fortschreitenden Anstieg der Beladung des DPF führt. Durch den ansteigenden Gegendruck infolge des weiteren Anstiegs der DPF-Beladung nimmt auch der Massenstrom durch die Abgasgasrückführungseinheit zu und reduziert den Sauerstoffanteil des Frischgemisches weiter. Ein Bruchteil einer Kraftstofftankfüllung genügt nach der Blockade des AGR-Ventils bis zum Zustand eines deutlich überladenen DPF. Für den Fahrer nicht vorhersehbar (auch nicht bei aktiver Glühwendel oder Motorkontrollleuchte MIL) erfolgt nach Sekunden bis wenigen Minuten nach der Überladung des DPF mindestens eines von mehreren Schadensszenarien: mangelhafte Lastaufnahme, komplettes Versagen der Lastaufnahme, kompletter unerwünschter Motorstillstand oder unkontrollierter Abbrand eines deutlich überladenen DPF inkl. Fahrzeugbrand bei einer Überlagerung ungünstiger Randbedingungen. Auch vorbeugende Motorsteuerungseingriffe, wie die Reduzierung der Motorleistung nach Blockade des AGR-Ventils, können diese Risiken bei einer Missachtung der temperaturabhängigen AGR nicht verhindern. Die Vermeidung dieses kri-

tischen Zustandes war explizites Entwicklungsziel und Forschungsgegenstand. Zudem besteht bei hohen Abgasrückführraten und kalten Außentemperaturen die Gefahr der Wasserkondensation im Ansaugpfad, was ebenfalls zu einem Motorausfall führen kann. Daher war die temperaturabhängige AGR-Regelung wesentliches Lösungselement zur Sicherstellung des Fahrzeugbetriebes. Das unkontrollierte Lösen angesammelter Ablagerungen im AGR-Trakt ist eine weitere Herausforderung und kann ebenfalls, auch ohne Klemmen des AGR-Ventils, zu gravierenden (Mitreißer-) Schäden führen.

Handelt es sich um einen relevanten Schadensfall?

Ohne Absicherung bei niedrigen Temperaturen durch eine reduzierte AGR-Rate resultiert bei einem hohen und relevanten Anteil der insgesamt im Feld befindlichen EURO5 Dieselfahrzeuge[2] eine plötzliche und unvorhersehbare Blockade des AGR-Ventils, die auch durch Wartungsarbeiten nicht verhindert werden kann. Darauf folgt unmittelbar ein Motorbetrieb mit zu niedriger Sauerstoffkonzentration mit der Folge eines der genannten Schadensszenarien. Ohne die reduzierte AGR-Rate bei niedrigen Temperaturen würde damit in erheblichem Ausmaß gegen Vorgaben zur verantwortungsvollen ingenieurtechnischen Entwicklung und Absicherung sicherheitsrelevanter Systeme und gegen die ethischen Grundsätze eines Entwicklungsingenieurs verstoßen werden [281].

Sind die komplexen Wirkzusammenhänge der verschiedenen Subsysteme eine Besonderheit der dieselmotorischen Entwicklung?

Die dieselmotorischen Subsysteme Grundmotor, Abgasturbolader, Kühlsystem, Fahrzeugthermomanagement, Abgasnachbehandlung mitsamt DPF etc. sind zwingend gekoppelt zu betrachten. Ähnliche Beispiele sind (teil-)autonome Fahrsysteme, bei denen die Sensorik (Radar, Lidar, Ultraschall, Kamera) mitsamt Datenübertragung, Datenanalyse in einer zentralen Prozessoreinheit und entsprechenden Aktuatoren (Lenksystem, Bremssystem, Fahrzeugantrieb) unbedingt als eine Einheit angesehen werden müssen. Ein weiteres Technikexempel ist die gesamte Fahrzeugsicherheit. Im Crashfall müssen die Beschleunigungssensoren, die Steifigkeit der Karosserie, die Datenübertragung der Sensoren bis hin zu den aktiven Sicherheitselementen wie Gurtstraffer und Auslösung der Airbags als System aufeinander abgestimmt werden. Zur Absicherung des Gesamtsystems und zur Vermeidung schwerwiegender Sicherheitsrisiken wurden auch bei dem EURO5 Entwicklungsprozess Fehlererkennungsanalysen (z.B. FMEA, failure mode and error analysis) angewandt, um aus Produkthaftungs- und Verbraucherschutzgründen mögliche Risiken und Gefahren im Betrieb schon in der Entwicklung zu identifizieren und nachfolgend zu vermeiden [282–285].

[2] Diese Aussage bezieht sich auf Fahrzeuge mit gekühltem HD-AGR-System. Die HD-AGR Technologie hatte bei Einführung der EURO5-Norm aufgrund der Kühlung und resultierender niedriger Verbrennungstemperaturen ein insgesamt etabliertes und dokumentiertes NO_x-Reduktionspotential bis oberhalb von 80% (bei einem Anteil von 10% rezirkuliertem Abgas des angesaugten Luft/AGR Gemisches können die anfallenden NO_x-Emissionen um ca. 60% reduziert werden), das trotz ebenfalls vorhandener technischer Herausforderungen wie Versottung, Verlacken und Vereisen mit dem benötigten Reifegrad verfügbar war. Verschiedene technische Alternativen (siehe Fußnote [1]) wurden ebenfalls schrittweise eingeführt. Eine Einführung der damals neuesten Alternativen mit teilweise unbekannten Gesamtsystemauswirkungen war innerhalb der anspruchsvollen EURO5 Entwicklungszeitleiste nicht für die gesamte Fahrzeugflotte umsetzbar. Neue Ladeluftkühlkonzepte wurden in Dieselmotoren schrittweise circa ab 2012 eingeführt.

2. Keine Lösung der temperaturabhängigen Abgasrückführung durch Katalysatornachrüstung

Als Lösung für den Verzicht auf Thermofenster wird zum Teil die Nachrüstung mit SCR-Katalysatoren diskutiert, welche mit Hilfe des Reduktionsmittels Adblue arbeitet. In einer Urteilsbegründung wurde beispielsweise behauptet, dass die Temperaturabhängigkeit der AGR-Regelung bei einer solchen SCR-Katalysatornachrüstung entfallen könne.

Verhindert nun eine solche SCR-Nachrüstlösung die generelle Notwendigkeit einer temperaturabhängigen Emissionsstrategie und eliminiert eine mögliche Katalysatornachrüstung das Risiko eines Fahrzeugschadens oder eines Fahrzeugausfalls?

Sowohl eine SCR-Technologie als auch eine Abgasrückführung sind temperaturabhängige Teilsysteme. Auch das Gesamtsystem verbleibt temperaturabhängig. Deshalb hätte eine Ausstattung von EURO5 Fahrzeugen mit einem SCR-Katalysator das Risiko bis hin zu einem Motorschaden oder sogar Fahrzeugbrand bei einer temperaturunabhängigen AGR-Regelung nicht eliminieren können.

Ein SCR Katalysator unterstützt die gewünschte NO_x-Reduzierung generell nur, wenn ein betriebswarmer Fahrzustand und ein Fahrprofil vorliegt, welches auch am SCR-Katalysator im Fahrzeugunterboden stabil Abgastemperaturen oberhalb von 180°-200°C ermöglicht. Bei derart erhöhten Temperaturen funktioniert die SCR-Katalyse sehr gut. Bei einem typischen Stadtprofil mit niedrigem Lastanteil und bei kalten Außentemperaturen ist die Wirkung einer solchen Nachrüstlösung jedoch geringer.

Dies ist aus ingenieurstechnischer und wissenschaftlicher Sicht unstrittig. Zahlreiche Publikationen weisen auf dieses klassische Dilemma der dieselmotorischen Entwicklung hin, das aufgrund des hohen Wirkungsgrades des Dieselmotors entsteht [16, 17, 286–306]. Generell ist darauf hinzuweisen, dass für jede Leistungs-, Getriebe-, Fahrzeug- und Antriebskonzeptvariante eine weitreichende, jahrelange Neuabsicherung vonnöten ist, die beispielsweise Emissionsverhalten, Fahrbarkeit, Betriebssicherheit, OBD-Entwicklung, Reparatur- und Wartungsabsicherung und zahlreiche weitere Umfänge enthält.

Mit einer neuen Technologiegeneration der motornahen SCR-Katalyse durch eine neue SCR-Beschichtung im DPF konnte mit dem Serienanlauf 2016 eine entscheidende Katalysatortemperaturerhöhung und somit eine weitere Verbesserung des Gesamtemissionsverhaltens bewirkt werden. Diese neue, sogenannte SDPF Technologie ist jedoch sehr anspruchsvoll, da die Filter durch die gleichzeitige Reduzierung der NO_x-Emissionen wenig NO_2 zur Reduzierung der Rußbeladung angeboten bekommen, was noch rußärmere motorische Brennverfahren bedingt, die in EURO5 Applikationen nicht umsetzbar waren und sind. Diese SDPF Technologie ist aus ingenieurtechnischer Sicht für Nachrüstlösungen ungeeignet!

Wie verhält sich eine SCR-Nachrüstlösung konkret bei niedrigen Temperaturen?

Vor allem bei niedrigen Motorlasten (Stadtverkehr) wirkt die Nachrüstung nur bei einer Gesamtsystemvertrimmung durch Aufheizen des SCR-Katalysators mit der Folge eines erhöhten Kraftstoffverbrauches. Der Mehrverbrauch an Kraftstoff kann weit über 10% liegen, was gleichbedeutend mit erhöhten CO_2-Emissionen bei niedrigen Temperaturen ist. Auch im Zusammenspiel zwischen EURO5 Dieselmotor und SCR-Nachrüstlösung resultiert bei niedrigen Temperaturen also ein NO_x- oder ein CO_2-Anstieg. Zudem ist das Heizpotential zur Sicherstellung der notwendigen SCR-Mindesttemperatur limitiert, weshalb auch im Fall der SCR-Nachrüstung bei niedrigen Außentemperaturen in ausgewählten Betriebszuständen die AGR-Regelung als entscheidende NO_x-Reduktionsmaßnahme verbleibt. Gleichwohl bestehen weiterhin die ingenieurstechnischen Grenzen. Eine temperaturabhängige AGR-Regelung bleibt daher unabdingbar.

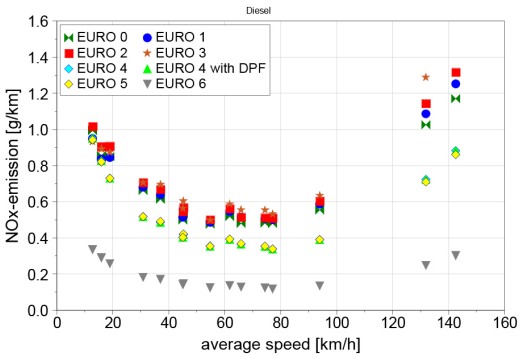
3. Allgemeiner Stand des Wissens und Informationsstand im Entwicklungszeitraum der EURO5 Technologie

Technische Herausforderungen werden bei der Ausarbeitung der regulatorischen Rahmenbedingungen berücksichtigt. Daher sind die Kenntnisse zum Zeitpunkt der Gesetzesausarbeitung wichtig.

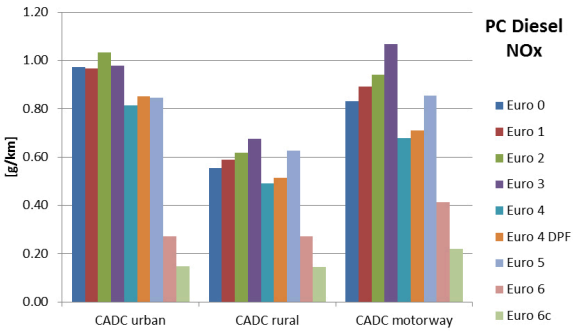
Welche Kenntnisse hatten wichtige politische Entscheidungsträger während des Entwicklungszeitraumes der EURO5 Technologie und danach?

Den politischen Entscheidungsträgern und an den Gesetzgebungsprozessen beteiligten Verantwortlichen auf nationaler und europäischer Ebene war umfassend bekannt, dass die dieselmotorische Technologie, die für die Gesamtflotte niedrige CO_2-Emissionen und somit niedrige Flottengrenzwerte ermöglicht, im Zeitfenster der EURO5/6 Entwicklung und Einführung im Realbetrieb deutlich höhere NO_x-Emissionen als im synthetischen NEFZ-Test aufweist (s. Abbildung 1 und Anhang). Es war ferner umfassend bekannt, dass die wesentlichen anderen Emissionskomponenten (Ruß, Partikel, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid) bereits mit der EURO5 Emissionsnorm weitestgehend immissionsneutral eliminiert wurden. Ebenfalls war die generelle Temperaturabhängigkeit der NO_x-Emissionen und die Erfordernis der temperaturabhängigen AGR-Regelung bekannt. Aufgrund der Komplexität beim Dieselmotor und in Kenntnis der Erfordernisse der temperaturabhängigen AGR-Regelung wurde auf Emissionsvorgaben bei kalten Temperaturen komplett verzichtet, anders als für ottomotorische Anwendungen mit bis zu 18fach erhöhter Grenzwertdefinition bei einer Außentemperatur von -7°C [307, 308].

A 2009 Handbuch für Emissionsfaktoren



B 2014 Handbuch für Emissionsfaktoren



C 2008 Amtsblatt der Europäischen Union

> 8. Darüber hinaus ist beabsichtigt, die Vorschriften zu überprüfen, nach denen die Hersteller den Typgenehmigungsbehörden Informationen über das Emissionsverhalten von Dieselfahrzeugen bei niedrigen Temperaturen zur Verfügung stellen müssen. Dies hängt damit zusammen, dass Dieselfahrzeuge mit Abgasrückführung und NO_x-Nachbehandlung bei niedrigen Temperaturen erhöhte NO_x-Emissionen verursachen können. Hier gilt es zu prüfen, ob die Niedrigtemperatur-Emissionsprüfung auf Euro-6-Dieselfahrzeuge ausgeweitet und ob in Zukunft ein Grenzwert eingeführt werden soll.

Abbildung 1: *Ausgewählte Dokumente im Zeitfenster zwischen 2009 und 2013*

A *EURO5 Dieselrealemissionen (über Geschwindigkeit) über 700 mg/km [309]*
B *EURO5 Dieselrealemissionen (Zyklus CADC) bis über 800 mg/km [310]*
C *Hinweis im Amtsblatt auf Notwendigkeit temperaturabhängiger Abgasrückführung und der Prüfung künftiger Grenzwerte für EU6-Dieselfahrzeuge [311]*

Der Vollständigkeit halber sei darauf verwiesen, dass generell die Umgebungstemperatur bei Auslegung und Regelung von Energiewandlungsanlagen berücksichtigt werden muss und kein Spezifikum von Dieselmotoren darstellt. So sind beispielsweise der Energiebedarf von Elektrofahrzeugen, die Emissionen des gesamten Stromsystems, die Emissionen einer Hausheizung, der Energiebedarf von Wärmepumpen oder die Emissionen von Flugtriebwerken allesamt temperaturabhängig.

4. Immissionskonzentrationen am Beispiel NO_2

Die NO_2-Immissionen sinken seit 15 Jahren kontinuierlich. Es bedarf einer genaueren Analyse der Temperaturabhängigkeit.

Was beeinflusst die NO_2-Immissionen in den Städten und gibt es eine NO_2-Abhängigkeit vor allem von niedrigen Außentemperaturen?

Aus erhöhten NO_x-Emissionen bei niedrigen Temperaturen wird regelmäßig auf erhöhte NO_2-Immissionen in den Städten gefolgert[3]. Hieraus wird ein Umweltrisiko im Kaltbetrieb abgeleitet. Jedoch ist die NO_2-Immissionsbelastung in den Städten weitestgehend unabhängig von kalten Außentemperaturen. Dies ist seit langem bekannt und wird nachfolgend bündig und im Anhang etwas umfangreicher erläutert.

Entscheidend für die NO_2-Immissionsbelastung vor allem innerhalb von Ballungszentren sind neben den NO_2-Direktemissionen der Fahrzeuge vor allem die NO-Emissionen und deren nachgelagerte Umwandlung zu NO_2. Diese sogenannte sekundäre NO_2-Bildung aus NO ist im Anhang detaillierter erläutert und hängt von mehreren Parametern ab. Hierbei sind insbesondere zu nennen:

- das atmosphärische Austauschvolumen, charakterisiert durch die sogenannte Grenzschichthöhe von typischerweise einigen hundert Metern;
- das Niveau der turbulenten kinetischen Energie innerhalb der Grenzschicht;
- insbesondere die Windstärke und Windrichtung;
- die Umgebungstemperatur am Tag und in der Nacht;
- vorliegende andere Immissionskomponenten.

Durch die Wechselwirkung mehrerer Effekte liegt bekanntermaßen keine relevante NO_2-Immissionsauffälligkeit bei niedrigen Temperaturen vor.

Abbildung 2 und Abbildung 3 und eine weitere Abbildung im Anhang zeigen die bekannte Immissionssituation an ausgewählten Messpunkten in Deutschland nahe vielbefahrener Straßen. Für alle Messdaten eines Jahres wurde die stundengemittelte NO_2 Immissionskonzentration über der entsprechenden Außentemperatur aufgetragen.

Sowohl im Jahr 2008 (während der EURO5 Entwicklung) als auch zum Zeitpunkt der umfassenden Flottenpenetration von EURO5 Fahrzeugen nach Ablauf des EURO5 Emissionszeitraumes im Jahr 2014 sowie nach flächendeckender Einführung der überarbeiteten Softwareupdates im Jahr 2022 zeigte keine Messstation eine signifikante NO_2-Auffälligkeit bei niedrigen Außentemperaturen an. Zudem ist eine kontinuierliche Verbesserung der NO_2-Immissionen zwischen 2008 und 2022 deutlich ersichtlich. Weitere Details sind im Anhang aufgeführt (S. 41-44).

Bei den meisten Messungen während der kalten Jahreszeit ist in innerstädtischen Bereichen die NO_2-Konzentration sogar niedriger als bei höheren Temperaturen. Ein positiver Gradient der Trendlinie (siehe Anhang Tabelle 1) demonstriert dieses Verhalten. Lediglich bei 2 Messserien im Jahr 2022 (Kiel, DESH027, Bahnhofstraße und Stuttgart, DEBW116, Hohenheimer Straße) ist die NO_2-Konzentration bei 0°C höher (jedoch weniger als 3 µg/m^3) als der Jahresmittelwert[4].

[3] Emissionen sind die ausgestoßenen Schadstoffe, aus denen aufgrund Verdünnung und anderer Umwelteinflüsse lokale Konzentrationen resultieren, die Schadstoffimmission. Dies wird insbesondere im Anhang am Beispiel der NO_x-Emissionen und NO_2-Immission erläutert.

[4] Die Messungenauigkeit der CLD-basierten Immissionsbestimmungssysteme zur Analyse der NO_2-Konzentration wird in Fachkreisen deutlich größer als 3 µg/m^3 bewertet.

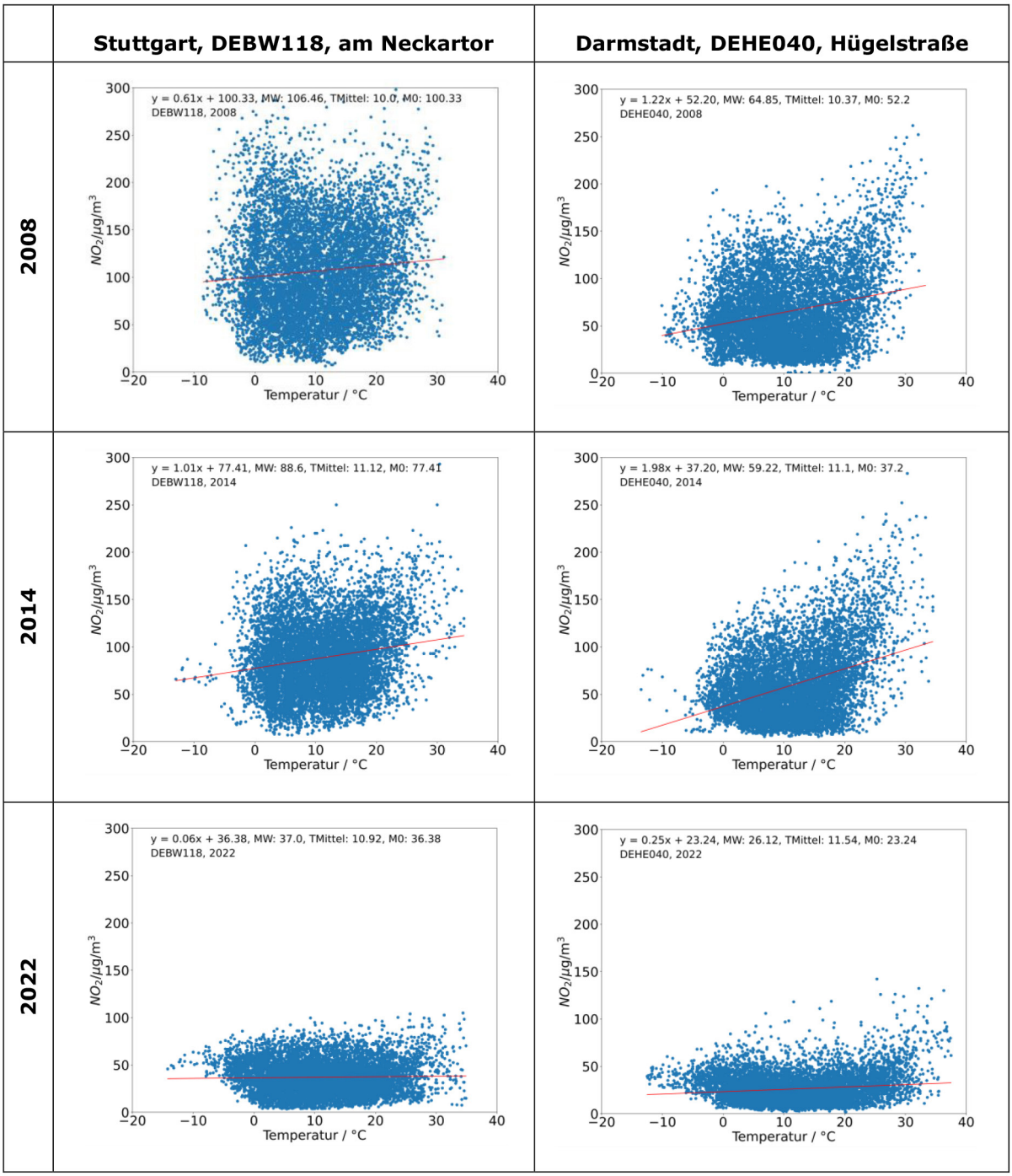


Abbildung 2: *NO_2 Immissionsentwicklung über die Jahre 2008, 2014 und 2022 am Beispiel von 2 Messstationen. Weitere Messergebnisse sind in Abbildung 3 und im Anhang dargestellt. Gezeigt sind für jedes Diagramm alle Stundenmittelwerte eines Jahres über den entsprechenden Temperaturen zum jeweiligen Zeitpunkt[5].*

links: *Stuttgart, Messstation DEBW118, am Neckartor*
rechts: *Darmstadt, Messstation DEHE040, Hügelstraße*

[5] Bei Aufzeichnung aller Messpunkte würden in einem Schaltjahr 8784 und in einem Nichtschaltjahr 8760 Messpunkte vorliegen. Vereinzelt fehlen Messpunkte, die nicht aufgezeichnet wurden.

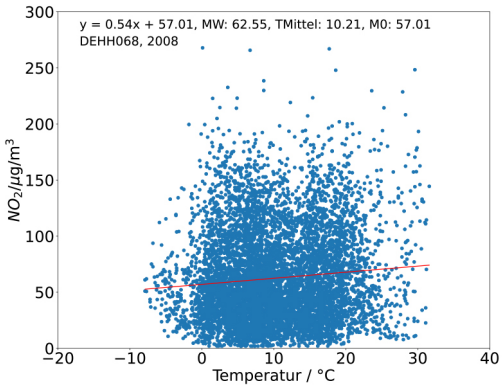
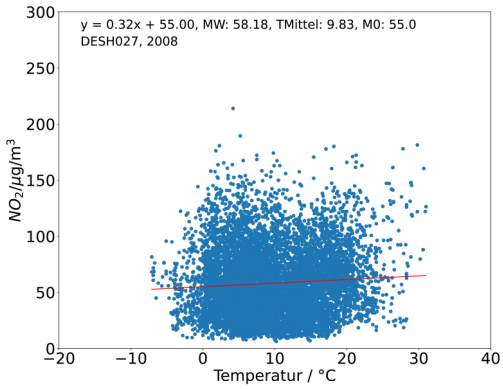
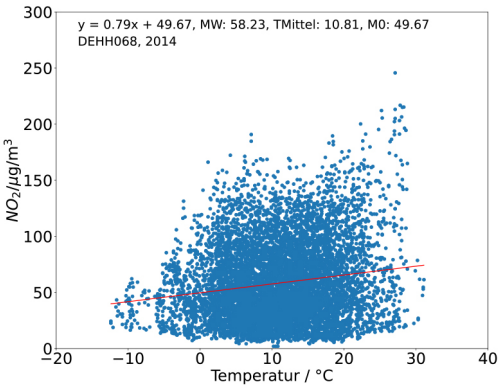
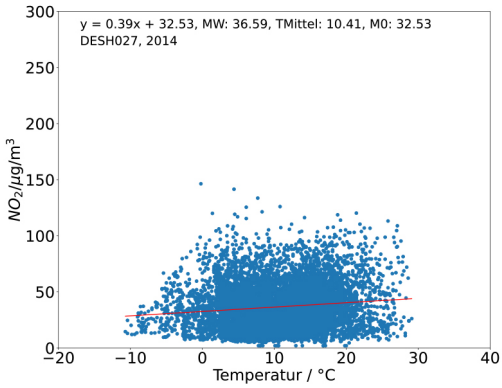
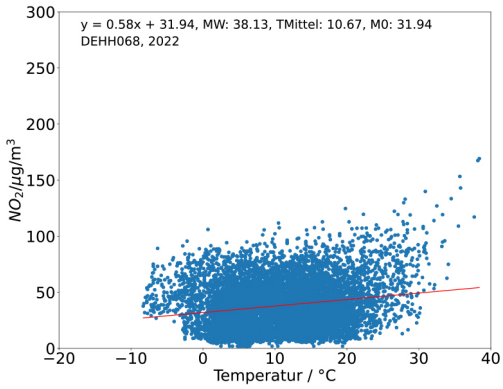
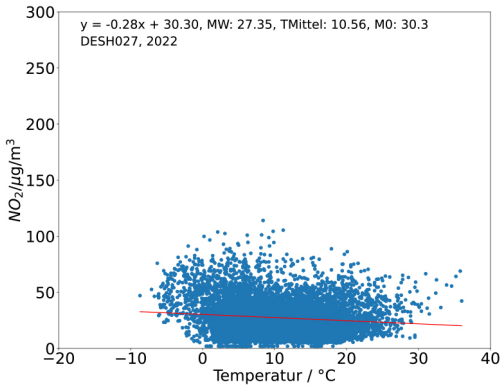
	Hamburg, DEHH068, Habichtstraße	Kiel, DESH027, Bahnhofstraße
2008		
2014		
2022		

Abbildung 3: *NO_2 Immissionsentwicklung über die Jahre 2008, 2014, 2022 am Beispiel von 2 weiteren Messstationen. Weitere Messergebnisse sind zudem im Anhang dargestellt. Abgebildet sind für jedes Diagramm alle Stundenmittelwerte eines Jahres über den entsprechenden Temperaturen zum jeweiligen Zeitpunkt[6].*

links: *Hamburg, Messtation DEHH068, Habichtstraße*
rechts: *Kiel, Messstation DESH027, Bahnhofstraße*

[6] Bei Aufzeichnung aller Messpunkte würden in einem Schaltjahr 8784 und in einem Nichtschaltjahr 8760 Messpunkte vorliegen. Vereinzelt fehlen Messpunkte, die nicht aufgezeichnet wurden.

Literatur

1. WKM: Die Zukunft des Verbrennungsmotors/Bewertung der dieselmotorischen Situation [online] (2017). Verfügbar unter: https://wkm-ev.de/images/20170708_Die_Zukunft_des_Verbrennungsmotors.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

2. KASTEN, P.: Klimaschutzinstrumente im Verkehr [online]. CO_2-Flottenzielwerte für Pkw (2021), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba-kurzpapier_flottenzielwerte_pkw_kliv.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

3. RODT, S., B. GEORGI, B. HUCKESTEIN, L. MÖNCH, R. HERBENER, H. JAHN, K. KOPPE und J. LINDMAIER: CO_2-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland [online]. Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale. Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes (2010), Dessau-Roßlau. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3773.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

4. KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: Fachartikel: Emissionen und Kraftstoffe [online] (2011). Verfügbar unter: https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/Fachartikel/emission_20110315.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [Stand: 27. Dezember 2023]

5. SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN: Potenziale und Instrumente zur CO_2-Verminderung von PKW [online]. Auszüge aus dem Sondergutachten Umwelt und Straßenverkehr (2005). Verfügbar unter: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2004_2008/2005_08_SG_Strassenverkehr_Auszuege.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Stand: 27. Dezember 2023]

6. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY: CO_2 emissions performance of car manufacturers in 2011 [online] (2012), Kopenhagen. Verfügbar unter: https://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-performance-of-car/file#:~:text=The%20average%20EU%20emissions%20of,manufacturers%20were%20below%20this%20value. [Stand: 27. Dezember 2023]

   Zitat: „The increasing share of diesel […] has also contributed to the observed emission reductions. […] As a general observation, dieselisation […], i.e. the introduction of more diesel vehicles, is one of the main drivers for the emissions reductions of the major manufacturers […].” (S. 8)

7. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY: CO_2 emissions performance of car manufacturers in 2012 [online] (2013), Kopenhagen. Verfügbar unter: https://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-performance-of-car-1 [Stand: 27. Dezember 2023]

   Zitat: „As a general observation, dieselisation […] (the introduction of more diesel vehicles) is one of the main drivers for the emissions reductions of the large manufacturers […].“ (S. 10-11)

8. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY: Monitoring CO_2 emissions from passenger cars and vans in 2013 [online] (2014), Kopenhagen. Verfügbar unter: https://www.eea.europa.eu/publications/monitoring-co2-emissions-from-passenger [Stand: 27. Dezember 2023]

   Zitat: „During the period 2004–2013 CO_2 emissions have decreased significantly. […] whereas the average mass of diesel vehicles increased despite the decrease of emissions over the same period.“ (S. 15)

9. MERKEL, A.: Rede von Bundeskanzlerin Merkel vor dem Deutschen Bundestag am 5. September 2017 [online], Berlin. Verfügbar unter: https://www.bundeskanzler.de/bk-de/aktuelles/rede-von-bundeskanzlerin-merkel-vor-dem-deutschen-bundestag-am-5-september-2017-794120 [Stand: 13. Dezember 2023]

Zitat: „Wir müssen den Menschen, die sich im Übrigen im guten Glauben und von uns auch ermuntert Dieselautos gekauft haben, die Möglichkeit geben, dass sie diese Autos auch nutzen können. Im Übrigen ist es so, dass wir den Kauf von Dieselautos […] deshalb empfohlen haben, weil dadurch CO_2-Emissionen eingespart wurden. Gegen den Diesel vorzugehen, bedeutet gleichermaßen auch, gegen die CO_2-Ziele, die wir uns gesetzt haben, vorzugehen. Und das darf nicht passieren."

10. CHRIST, H.: Ethische Grundsätze des Ingenieurberufs [online] (2002), VDI, Düsseldorf. Verfügbar unter: https://www.vdi.de/fileadmin/pages/mein_vdi/redakteure/publikationen/VDI_Ethische_Grundsaetze.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

11. KLINDT, T.: Ingenieurshaftung: „Es reicht nicht, die technischen Normen zu kennen" (2007), FAZ. Verfügbar unter: https://www.faz.net/aktuell/karriere-hochschule/recht-und-gehalt/ingenieurshaftung-es-reicht-nicht-die-technischen-normen-zu-kennen-1436945.html [Stand: 13. Dezember 2023]

12. BUNDESINGENIEURKAMMER: Vorschläge der Bundesingenieurkammer zur Überarbeitung des Musteringenieurgesetzes [online] (2016). Verfügbar unter: https://www.ing-net.de/o.red/theme/files/datei/1479130745-binkvorschlaegezurUeberarbeitungmig.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

13. BUNDESINGENIEURKAMMER: Das Berufsbild des Ingenieurs [online]. Gemeinsame Eckpunkte der Ingenieurkammern der Länder (2014). Verfügbar unter: https://www.ingbw.de/fileadmin/pdf/Merkblatt/Berufsbild-des-Ingenieurs_05-2014.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

14. EUROPÄISCHE KOMMISSION: Clean Mobility: Commission tables proposal on car emissions testing in real driving conditions [online] (2019), Brüssel. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA_19_2850 [Stand: 27. Dezember 2023]

15. KELLER, M., S. HAUSBERGER, C. MATZER, P. WÜTHRICH und B. NOTTER: HBEFA Version 3.3 [online]. Hintergrundbericht (2017), Infras, Bern. Verfügbar unter: https://assets-global.website-files.com/6207922a2acc01004530a67e/625eb52f0de9e093549625c6_HBEFA33_Hintergrundbericht.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

16. BAAR, R., M. BARGENDE, C. BEIDL, T. KOCH und H. ROTTENGRUBER: Forschungsprojekt: NOX-Reduzierungsnachrüstmöglichkeiten [online]. Kurzstudie: Wissenschaftliche Untersuchungen hardwareseitiger NOx-Reduzierungsnachrüstmöglichkeiten im Pkw-Bereich und im Segment der leichten Nutzfahrzeuge (2018), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/nox-reduzierungsnachruestmoeglichkeiten.pdf?__blob=publicationFile [Stand: 27. Dezember 2023]

17. KOCH, T., C. BEIDL und H. ROTTENGRUBER: Wissenschaftliche Analyse zum Einsatz temperaturabhängiger Emissionsregelungen von Dieselmotoren (2020), Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-662-61876-9

18. DIPPOLD, M. und S. HAUSBERGER: Ermittlung von Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw mit Softwareupdate (EFA-SU) [online] (2021), Umweltbundesamt, Graz. Verfügbar unter: https://assets-global.website-files.com/6207922a2acc01004530a67e/64f6f84cfab21fd70cb9fe2d_TUG2021_ermittlung_emissionsfaktoren_pkw_SU_UBA_texte_87-2021.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

19. ABDALLA, A., G. WANG, J. ZHANG und S.-J. SHUAI: Simulation of Catalyzed Diesel Particulate Filter for Active Regeneration Process Using Secondary Fuel Injection [online] (2017), International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2017-01-2287

20. ABIÁN, M., C. MARTÍN, P. NOGUERAS, J. SÁNCHEZ-VALDEPEÑAS, J. RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, M. LAPUERTA und M.U. ALZUETA: Interaction of diesel engine soot with NO_2 and O_2 at diesel exhaust conditions. Effect of fuel and engine operation mode [online] (2018), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2017.10.025

21. ADOMEIT, P., M. BECKER, H. ROHS, S. PISCHINGER, A. GREIS und G. GRÜNEFELD: Potential Soot and CO Reduction for HSDI Diesel Combustion Systems [online] (2006), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2006-01-1417

22. BAGAVATHY, S.S., A. RAMESH, A. KRISHNASAMY und S. PANDIAN: Calibration and Parametric Investigations on Lean NOx Trap and Particulate Filter Models for a Light Duty Diesel Engine [online] (2020), WCX SAE World Congress Experience. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-0657

23. BAGHERI, M. und R. BAAR: Simultaneous Application of Exhaust Gas Recirculation and Non-Constant Injection Rates to Reduce NOx and Soot Emissions in Diesel Engines [online] (2018), Emission Control Science and Technology, ISSN 2199-3629. Verfügbar unter: doi:10.1007/s40825-017-0080-4

24. BALLINGER, T., J. COX, M. KONDURU, D. DE, W. MANNING und P. ANDERSEN: Evaluation of SCR Catalyst Technology on Diesel Particulate Filters [online] (2009), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-01-0910

25. BARRO, C., P. OBRECHT und K. BOULOUCHOS: Development and validation of a virtual soot sensor: Part 1: steady-state engine operation [online] (2014), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087413512309

26. BARRO, C., P. OBRECHT und K. BOULOUCHOS: Development and validation of a virtual soot sensor: Part 2: Transient engine operation [online] (2015), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087414533786

27. BASU, S. und N. CURRIER: Analytic Solution for the Flow Distribution and Pressure Drop of Ceramic Partially-Plugged Wall Flow Diesel Particulate Filters [online] (2015), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2015-01-1056

28. BERGMANN, M., U. KIRCHNER, R. VOGT und T. BENTER: On-road and laboratory investigation of low-level PM emissions of a modern diesel particulate filter equipped diesel passenger car [online] (2009), Atmospheric Environment, ISSN 13522310. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.atmosenv.2008.12.039

29. BERNEMYR, H., C. PAVLOU, A. ERSSON und F. REGALI: Theoretical Assessment of Rigs for Accelerated Ash Accumulation in Diesel Particulate Filters [online] (2020), SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-2175

30. BHARDWAJ, O.P., F. KREMER, S. PISCHINGER, B. LÜERS, A.F. KOLBECK und T. KOERFER: Impact of Biomass-Derived Fuels on Soot Oxidation and DPF Regeneration Behavior [online] (2013), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2013-01-1551

31. BHARDWAJ, O.P., B. LÜERS, B. HEUSER, B. HOLDERBAUM und S. PISCHINGER: Fuel formulation effects on the soot morphology and diesel particulate filter regeneration in a future optimized high-efficiency combustion system [online] (2017), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087416675059

32. BLECKMANN, J., M. STILLER und U. GÄRTNER: „Stickoxidfreies Abgas" aus Nutzfahrzeug-Dieselmotoren (2018), 10. Internationales AVL Forum Abgas- und Partikel-Emissionen, Ludwigsburg

33. BOBBA, M.K., C.L. GENZALE und M.P.B. MUSCULUS: Effect of Ignition Delay on In-Cylinder Soot Characteristics of a Heavy Duty Diesel Engine Operating at Low Temperature Conditions [online] (2009), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-01-0946

34. BOGER, T., D. ROSE, I.-C. TILGNER und A.K. HEIBEL: Regeneration Strategies for an Enhanced Thermal Management of Oxide Diesel Particulate Filters [online] (2009), SAE International Journal of Fuels and Lubricants. Verfügbar unter: doi:10.4271/2008-01-0328

35. BOGER, T., I.-C. TILGNER, M. SHEN und Y. JIANG: Oxide Based Particulate Filters for Light-Duty Diesel Applications – Impact of the Filter Length on the Regeneration and Pressure Drop Behavior [online] (2009), SAE International Journal of Fuels and Lubricants. Verfügbar unter: doi:10.4271/2008-01-0485

36. BOLLA, M., D. FARRACE, Y.M. WRIGHT, K. BOULOUCHOS und E. MASTORAKOS: Influence of turbulence–chemistry interaction for *n*-heptane spray combustion under diesel engine conditions with emphasis on soot formation and oxidation [online] (2014), Combustion Theory and Modelling, ISSN 1364-7830. Verfügbar unter: doi:10.1080/13647830.2014.898795

37. BOLLA, M., Y.M. WRIGHT, K. BOULOUCHOS, G. BORGHESI und E. MASTORAKOS: Soot Formation Modeling of *n*-Heptane Sprays Under Diesel Engine Conditions Using the Conditional Moment Closure Approach [online] (2013), Combustion Science and Technology, ISSN 0010-2202. Verfügbar unter: doi:10.1080/00102202.2012.752362

38. BRILLANT, S. und G. ZIKORIDSE: Metal Fibre Diesel Particulate Filter: Function and Technology [online] (2005), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2005-01-0580

39. BROTZ, M., M. MAUL, H.-J. BERNER und M. BARGENDE: Investigation of High Internal Residual Gas Rates in Rich Operating Mode for Diesel Lean NOx Trap Regeneration [online] (2021), SAE WCX Digital Summit. Verfügbar unter: doi:10.4271/2021-01-0592

40. BRÜCKNER, C., P. KYRTATOS und K. BOULOUCHOS: NOx emissions in direct injection diesel engines: Part 2: model performance for conventional, prolonged ignition delay, and premixed charge compression ignition operating conditions [online] (2018), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087417721558

41. BRÜCKNER, C., S.S. PANDURANGI, P. KYRTATOS, M. BOLLA, Y.M. WRIGHT und K. BOULOUCHOS: NOx emissions in direct injection diesel engines – part 1: Development of a phenomenological NOx model using experiments and three-dimensional computational fluid dynamics [online] (2018), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087417704312

42. CAMPBELL, B., M. PECKHAM, J. SYMONDS, J. PARKINSON und A. FINCH: Transient Gaseous and Particulate Emissions Measurements on a Diesel Passenger Car including a DPF Regeneration Event [online] (2006), SAE 2006 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2006-01-1079

43. CAO, C., H. YANG, J. XIAO, X. YANG, B. REN, L. XU, G. LIU und X. LI: Catalytic diesel soot elimination over potassium promoted transition metal oxide (Co/Mn/Fe) nanosheets monolithic catalysts [online] (2021), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2021.121446

44. CÁRDENAS, M.D., O. ARMAS, C. MATA und F. SOTO: Performance and pollutant emissions from transient operation of a common rail diesel engine fueled with different biodiesel fuels [online] (2016), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2016.08.002

45. CARRARA, M.: Formation of nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons in diesel particulate filters: laboratory experiments and test-bench measurements (2010)

46. CHARBONNEL, S. und C.N. OPRIS: Fundamental Diesel Particulate Filter (DPF) Pressure Drop Model [online] (2009), SAE World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-01-1271

47. CHAUDHARI, K.A., S. ARALE, A.S. ARAVIND, P. MADHUKAR und M. WOLTER: Method to Improve DPF Regeneration Performance for Challenging Driving Profiles [online] (2022), 10TH SAE India International Mobility Conference. Verfügbar unter: doi:10.4271/2022-28-0326

48. CHEN, C., A. YAO, C. YAO und G. QU: Experimental study of the active and passive regeneration procedures of a diesel particulate filter in a diesel methanol dual fuel engine [online] (2020), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2019.116801

49. CHEN, P., U. IBRAHIM und J. WANG: Experimental investigation of diesel and biodiesel post injections during active diesel particulate filter regenerations [online] (2014), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2014.04.046

50. CHEN, Y., P. TAN, L. DUAN, Y. LIU, D. LOU und Z. HU: Emission characteristics and performance of SCR coated on DPF with different soot loads [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2022.125712

51. CHIAVOLA, O., G. CHIATTI, D.M. CAVALLO, E. MANCARUSO und B.M. VAGLIECO: Modeling of Soot Deposition and Active Regeneration in Wall-flow DPF and Experimental Validation [online] (2020), SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-2180

52. CHOI, S. und K. LEE: Detailed Investigation of Soot Deposition and Oxidation Characteristics in a Diesel Particulate Filter Using Optical Visualization [online] (2013), SAE 2013 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2013-01-0528

53. CHUNDRU, V.R., G.G. PARKER und J.H. JOHNSON: The Effect of NO_2/NO_x Ratio on the Performance of a SCR Downstream of a SCR Catalyst on a DPF [online] (2019), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/04-12-02-0008

54. COLOMBO, M., G. KOLTSAKIS und I. KOUTOUFARIS: A Modeling Study of Soot and De-NOx Reaction Phenomena in SCRF Systems [online] (2011), Highlighting the Latest Powertrain, Vehicle and Infomobility Technologies. Verfügbar unter: doi:10.4271/2011-37-0031

55. CONWAY, R., S. CHATTERJEE, M. NASERI und C. AYDIN: Demonstration of SCR on a Diesel Particulate Filter System on a Heavy Duty Application [online] (2015). Verfügbar unter: doi:10.4271/2015-01-1033

56. COZZOLINI, A., V. MULONE, P. ABEYRATNE, D. LITTERA und M. GAUTAM: Advanced Modeling of Diesel Particulate Filters to Predict Soot Accumulation and Pressure Drop [online] (2011), 10th International Conference on Engines & Vehicles. Verfügbar unter: doi:10.4271/2011-24-0187

57. DA COSTA, C.M., R. MOZARDO und N.M. SHIRAIWA: Diesel Particulate Filter Application with PROCONVE CONAMA P5 Engines (EURO III), Mercedes-Benz Experience [online] (2013), 22nd SAE Brasil International Congress and Display. Verfügbar unter: doi:10.4271/2013-36-0383

58. DEMIR, U., A. KOZAN und S. ÖZER: Experimental investigation of the effect of urea addition to fuel on engine performance and emissions in diesel engines [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2021.122578

59. DEPCIK, C.: Combining the Classical and Lumped Diesel Particulate Filter Models [online] (2015), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2015-01-1049

60. DI IORIO, S., C. BEATRICE, C. GUIDO, N. DEL GIACOMO, P. NAPOLITANO und A. VASSALLO: Analysis of Particle Mass and Size Emissions from a Catalyzed Diesel Particulate Filter during Regeneration by Means of Actual Injection Strategies in Light Duty Engines [online] (2011), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2011-24-0210

61. DI SARLI, V. und A. DI BENEDETTO: Modeling and simulation of soot combustion dynamics in a catalytic diesel particulate filter [online] (2015), Chemical Engineering Science, ISSN 00092509. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ces.2015.06.011

62. DI SARLI, V., G. LANDI, L. LISI und A. DI BENEDETTO: Ceria-coated diesel particulate filters for continuous regeneration [online] (2017), AIChE journal, ISSN 0001-1541. Verfügbar unter: doi:10.1002/aic.15688

63. DIMOPOULOS EGGENSCHWILER, P. und D. SCHREIBER: Investigation of the Oxidation Behavior of Soot in Diesel Particle Filter structures [online] (2015), 12th International Conference on Engines & Vehicles. Verfügbar unter: doi:10.4271/2015-24-2516

64. DIMOPOULOS EGGENSCHWILER, P., D. SCHREIBER und A. LIATI: Active Regeneration Characteristics in Diesel Particulate Filters (DPFs) [online] (2011), 10th International Conference on Engines & Vehicles. Verfügbar unter: doi:10.4271/2011-24-0185

65. DITTLER, A.: Development history and system integration aspects of exhaust gas aftertreatment applying diesel particulate filters in commercial vehicles (2009), Filtech, Wiesbaden

66. DITTLER, A.: Dieselpartikelfiltersysteme – Ingenieurwissenschaftliche Aspekte der Auslegung, Betriebsweise & Fahrzeugintegration in Nutzfahrzeuge (2010), 8. Internationales CTI Forum "Abgastechnik", Stuttgart

67. DITTLER, A.: Ash Transport in Diesel Particle Filters [online] (2012), SAE 2012 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2012-01-1732

68. DITTLER, A.: Ingenieurwissenschaftliche Aspekte der Applikation von Dieselpartikelfiltern in Nutzfahrzeugen (2012), 6. Emission Control Conference, Dresden

69. DITTLER, A.: Abgasnachbehandlung mit Partikelfiltersystemen in Nutzfahrzeugen. Zugl.: Wuppertal, Univ., Habil.-Schr., 2014 (2014), Aachen, Shaker, Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit, ISBN 978-3-8440-3010-5

70. DITTLER, A.: The application of diesel particle filters – from past to present and beyond (2015), Konferenzbeitrag, 10th International Congress on Catalysis and Automotive Pollution Control (CAPoC10), Brüssel

71. DITTLER, A.: The Application of Diesel Particle Filters—From Past to Present and Beyond [online] (2017), Topics in Catalysis. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11244-016-0621-z

72. DITTLER, A.: Ablöse- und Umlagerungsvorgänge reaktiver Partikelschichten in DPFs – Einfluss auf Betriebsverhalten und Standzeit (2018), 5. Internationale Fachkonferenz "Emissionsreduktion und Emissionssensoren", Stuttgart

73. DITTLER, A. und U. GÄRTNER: Diesel-Partikel-Filter Systeme – Entwicklungshistorie & technische Herausforderungen (2005), 2. CTI Fachkonferenz Diesel-Partikel-Filter, Stuttgart

74. DITTLER, A. und U. GÄRTNER: Ascheentfernung aus Partikelfiltern mittels Flüssigkeitsrückspülung (2013), Konferenzbeitrag, 11. FAD-Konferenz, Dresden

75. DITTLER, A. und U. GÄRTNER: EuroVI global – Betriebsstoffe egal? (2015), 13. FAD-Konferenz "Herausforderung – Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren", Dresden

76. DÖRNHÖFER, J. und T. KOCH: Entwicklung und Anwendung eines minimalinvasiven Messverfahrens zur Analyse der Strömungszustände in einer Realabgasanlage (2019), 7. Boysen Doktoranden-Treffen

77. DU, Y., Z. MENG, J. FANG, Y. QIN, Y. JIANG, S. LI, J. LI, C. CHEN und W. BAI: Characterization of soot deposition and oxidation process on catalytic diesel particulate filter with ash loading through an optimized visualized method [online] (2019), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2019.01.103

78. DWYER, H., S. YOON, D. QUIROS, M. BURNITZKI, R. RIEMERSMA, D. CHERNICH, J. COLLINS und J. HERNER: Ambient Emission Measurements from Parked Regenerations of 2007 and 2010 Diesel Particulate Filters [online] (2014), SAE 2014 Commercial Vehicle Engineering Congress. Verfügbar unter: doi:10.4271/2014-01-2353

79. E, J., M. ZHAO, Q. ZUO, B. ZHANG, Z. ZHANG, Q. PENG, D. HAN, X. ZHAO und Y. DENG: Effects analysis on diesel soot continuous regeneration performance of a rotary microwave-assisted regeneration diesel particulate filter [online] (2020), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2019.116353

80. E, J., P. ZHENG, D. HAN, X. ZHAO und Y. DENG: Effects analysis on soot combustion performance enhancement in a rotary diesel particulate filter unit during continuous microwave heating [online] (2020), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2020.118043

81. EASTWOOD, P.G., K. TUFAIL, T. WINSTANLEY, A. DARLINGTON, S. KARAGIORGIS, Y. HARDALUPAS und A.M.K.P. TAYLOR: Estimation of deviations in NO and soot emissions between steady-state and EUDC transient operation of a common-rail diesel engine [online] (2009), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-24-0147

82. FARAFONTOV, P., J. MUTER und S. WILLIAMS: Optimization of Partial Filter Technology for Diesel Engines [online] (2007), Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2007-01-4025

83. FENG, R., X. HU, G. LI, Z. SUN und B. DENG: A comparative investigation between particle oxidation catalyst (POC) and diesel particulate filter (DPF) coupling aftertreatment system on emission reduction of a non-road diesel engine [online] (2022), Ecotoxicology and environmental safety. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ecoenv.2022.113576

84. FENG, R., X. HU, G. LI, Z. SUN, M. YE und B. DENG: Exploration on the emissions and catalytic reactors interactions of a non-road diesel engine through experiment and system level simulation [online] (2023), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2023.127746

85. FUJII, S., T. ASAKO und K. YUUKI: Studies of Diesel Particulate Filter Performances by a Diesel Engine Simulator [online] (2010), SAE 2010 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2010-01-0813

86. FURUTA, Y., T. MIZUTANI, Y. MIYAIRI, K. YUKI und H. KURACHI: Study on Next Generation Diesel Particulate Filter [online] (2009), SAE World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-01-0292

87. GÄRTNER, U.: Wohin mit der Asche? – Einsatzspezifische Besonderheiten des Dieselpartikelfilters im Nutzfahrzeug (2012), Konferenzbeitrag, 1. Landshuter Omnisbustage „Linienbustechnik auf dem Weg zu EURO VI und darüber hinaus", Landshut

88. GÄRTNER, U. und A. DITTLER: Nicht oxidierbare Rückstände aus der dieselmotorischen Verbrennung – zusätzliche Anforderungen an die Partikelfiltertechnik von Nutzfahrzeugmotoren (2009), Motorische Verbrennung – Aktuelle Probleme und moderne Lösungsansätze (IX: Tagung), Haus der Technik/Uni Erlangen, München

89. GÄRTNER, U. und A. DITTLER: Ruß- oder Aschefilter? – Grundsatzuntersuchungen zur Filtration des Abgases von Nutzfahrzeug-Dieselmotoren (2014), Internationaler Motorenkongress, Baden-Baden

90. GÄRTNER, U., P. WERNER und T. KOCH: Wohin mit dem Ruß? – Grundlagen der passiven und thermischen Regeneration von Dieselpartikelfiltern im Nutzfahrzeug (2007), 5. FAD Konferenz, Dresden

91. GELNER, A.D., C. PASTOETTER, H.A. BECK, M. HÄRTL und G. WACHTMEISTER: Fuel Dosing on a Diesel Oxidation Catalyst for After-Treatment System Heating on a Heavy-Duty Engine Powered by Polyoxymethylene Dimethyl Ethers [online] (2020), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-2157

92. GHOSH, A., V. C, S. GOGIA, S. PANDIAN und G.P. RAMBHAJI: Factors affecting Regeneration interval of a Diesel Particulate Filter and their influence on BSV emission application [online] (2015), Symposium on International Automotive Technology 2015. Verfügbar unter: doi:10.4271/2015-26-0106

93. GRAZIANO, B., B. HEUSER, F. KREMER, S. PISCHINGER und H. ROHS: The Oxidation Potential Number: An Index to Evaluate Inherent Soot Reduction in D.I. Diesel Spray Plumes [online] (2016), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2015-01-1934

94. GURUPATHAM, A. und Y. HE: Architecture Design and Analysis of Diesel Engine Exhaust Aftertreatment System and Comparative Study with Close-coupled DOC-DPF System [online] (2009), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2008-01-1756

95. HANAMURA, K., P. KARIN, L. CUI, P. RUBIO, T. TSURUTA, T. TANAKA und T. SUZUKI: Micro- and macroscopic visualization of particulate matter trapping and regeneration processes in wall-flow diesel particulate filters [online] (2009), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1243/14680874JER04209

96. HANDS, T., M. TWIGG und M. GALLINGER: A New Instrument for Diesel Particulate Filter Functional Tests in Development and Quality Control Applications [online] (2010), SAE 2010 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2010-01-0809

97. HARALAMPOUS, O., M. MASTROKALOS, F. TZORBATZOGLOU und C. DRITSELIS: Filtration efficiency and pressure drop modelling of particulate filters with rear plug damage [online] (2020), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087420916679

98. HARVEL, G.D., J.-S. CHANG, A. TUNG, P. FANSON und M. WATANABE: Three-Dimension Deposited Soot Distribution Measurement in Silicon Carbide Diesel Particulate Filters by Dynamic Neutron Radiography [online] (2011), SAE 2011 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2011-01-0599

99. HATZIPANAGIOTOU, A., P. WENZEL, C. KRUEGER, R. PAYRI, J.M. GARCIA-OLIVER, W. VERA-TUDELA und T. KOCH: Soot Model Calibration Based on Laser Extinction Measurements [online] (2016), SAE 2016 World Congress and Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2016-01-0590

100. HERMANN, H.-O. und U. GÄRTNER: Bildung und Reduktion der Stickoxide bei Nfz-Dieselmotoren (2016), Konferenzbeitrag, 1. Tagung „Motorische Stickoxidbildung", Heidelberg

101. HERRMANN, O.E., M. KRÜGER und S. PISCHINGER: Regelung von Ladedruck und AGR-Rate als Mittel zur Emissionsregelung bei Nutzfahrzeugmotoren [online] (2005), MTZ – Motortechnische Zeitschrift, ISSN 0024-8525. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF03226717

102. HIRATA, K., N. MASAKI, M. YANO, H. AKAGAWA, K. TAKADA, J. KUSAKA und T. MORI: Development of an improved urea-selective catalytic reduction—diesel particulate filter system for heavy-duty commercial vehicles [online] (2009), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1243/14680874JER03709

103. HOFMANN, U., P. REINHARDT und G. ZIKORIDSE: Characterization of particulate emission of a diesel engine using conventional diesel fuel and biofuels [online] (2007), Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft. Verfügbar unter: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-47049124227&partnerID=40&md5=1c9e36003008de404472af6c73bbb84c#

104. HONG, S.J., B.S. KANG, M. PFEIFER, P. SPURK, K. FISCHER, E. LOX und K.V.R. BABU: Catalysed Diesel Particulate Filters for Passenger Car Applications – Development Concepts for the Present and the Future [online] (2005), SIAT 2005. Verfügbar unter: doi:10.4271/2005-26-023

105. HU, S., B. DENG, DI WU und K. HOU: Energy flow behavior and emission reduction of a turbo-charging and EGR non-road diesel engine equipped with DOC and DPF under NRTC (non-road transient cycle) [online] (2021), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2021.121571

106. HU, J., J. LIAO, Y. HU, J. LEI, M. ZHANG, J. ZHONG, F. YAN und Z. CAI: Experimental investigation on emission characteristics of non-road diesel engine equipped with integrated DOC+CDPF+SCR aftertreatment [online] (2021), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2021.121586

107. HUA, X., J. LIU, D.W. HERRIN und T. ELNADY: Numerical Simulation of Diesel Particulate Filters in Exhaust Systems [online] (2011), SAE 2011 Noise and Vibration Conference and Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2011-01-1559

108. HUANG, H.: Design and Validation of Silicon Carbide Diesel Particulate Filter with High Effective Filtration Area [online] (2020), Automotive Technical Papers. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-5044

109. HUANG, T., G. HU, F. GUO und Y. ZHU: Investigation of a Model-Based Approach to Estimating Soot Loading Amount in Catalyzed Diesel Particulate Filters [online] (2019), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/03-12-05-0036

110. HUANG, Y., E.C. NG, N.C. SURAWSKI, J.L. ZHOU, X. WANG, J. GAO, W. LIN und R.J. BROWN: Effect of diesel particulate filter regeneration on fuel consumption and emissions performance under real-driving conditions [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2022.123937

111. IWASAKI, S., T. MIZUTANI, Y. MIYAIRI, K. YUUKI und M. MAKINO: New Design Concept for Diesel Particulate Filter [online] (2011), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2011-01-0603

112. JANSSEN, A., S. PISCHINGER und M. MUETHER: Potential of Cellulose-Derived Biofuels for Soot Free Diesel Combustion [online] (2010), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2010-01-0335

113. JIANG, Y., Y. TAN, J. YANG, G. KARAVALAKIS, K.C. JOHNSON, S. YOON, J. HERNER und T.D. DURBIN: Understanding elevated real-world NOx emissions: Heavy-duty diesel engine certification testing versus in-use vehicle testing [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2021.121771

114. JIAO, P., Z. LI, B. SHEN, W. ZHANG, X. KONG und R. JIANG: Research of DPF regeneration with NOx-PM coupled chemical reaction [online] (2017), Applied thermal engineering, ISSN 1359-4311. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.184

115. JIN, Y., N. SHINODA, Y. UESAKA, T. KUKI, M. YAMASHITA, H. SAKAMOTO, T. MATSUMOTO, P. KATTOUAH und C.D. VOGT: Development of New High Porosity Diesel Particulate Filter for Integrated SCR Technology/Catalyst [online] (2015), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2015-01-1017

116. JOHNSON, T.V.: Review of diesel emissions and control [online] (2009), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1243/14680874JER04009

117. JOHNSON, T.V.: Diesel Emission Control in Review [online] (2009), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-01-0121

118. JUNG, Y., Y. PYO, J. JANG, Y. WOO, A. KO, G. KIM, Y. SHIN und C. CHO: Nitrous oxide in diesel aftertreatment systems including DOC, DPF and urea-SCR [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2021.122453

119. KAAL, B., M. GRILL und M. BARGENDE: Transient Simulation of Nitrogen Oxide Emissions of CI Engines [online] (2016), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2016-01-1002

120. KAMIMOTO, T., Y. MURAYAMA, T. MINAGAWA und T. MINAMI: Light scattering technique for estimating soot mass loading in diesel particulate filters [online] (2009), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1243/14680874JER03109

121. KAMP, C.J., P. FOLINO, Y. WANG, A. SAPPOK, J. ERNSTMEYER, A. SAEID, R. SINGH, B. KHARRAJA und V.W. WONG: Ash Accumulation and Impact on Sintered Metal Fiber Diesel Particulate Filters [online] (2015), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2015-01-1012

122. KANDYLAS, I.P. und G.C. KOLTSAKIS: NO_2-Assisted Regeneration of Diesel Particulate Filters: A Modeling Study [online] (2002), Industrial & Engineering Chemistry Research, ISSN 0888-5885. Verfügbar unter: doi:10.1021/ie010842m

123. KANG, W., S. PYO und H. KIM: Comparison of intake and exhaust throttling for diesel particulate filter active regeneration of non-road diesel engine with mechanical fuel injection pump [online] (2020), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087420926030

124. KAPPAROS, D.J., I. BRAHMA, A. STRZELEC, C.J. RUTLAND, D.E. FOSTER und Y. HE: Integration of Diesel Engine, Exhaust System, Engine Emissions and Aftertreatment Device Models [online] (2005), SAE 2005 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2005-01-0947

125. KHAIR, M.K.: Diesel Emissions and Their Control (2006), Warrendale, SAE International, ISBN 978-0-7680-4974-9

126. KIM, H.J., S. JO, S. KWON, J.-T. LEE und S. PARK: NO_x emission analysis according to after-treatment devices (SCR, LNT+SCR, SDPF), and control strategies in Euro-6 light-duty diesel vehicles [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2021.122297

127. KIRCHEN, P., P. OBRECHT und K. BOULOUCHOS: Soot Emission Measurements and Validation of a Mean Value Soot Model for Common-Rail Diesel Engines during Transient Operation [online] (2009), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-01-1904

128. KIRCHEN, P., P. OBRECHT, K. BOULOUCHOS und A. BERTOLA: Exhaust-Stream and In-Cylinder Measurements and Analysis of the Soot Emissions From a Common Rail Diesel Engine Using Two Fuels [online] (2010), Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ISSN 0742-4795. Verfügbar unter: doi:10.1115/1.4001083

129. KO, A., J. KIM, K. CHOI, C.-L. MYUNG, S. KWON, K. KIM, Y.J. CHO und S. PARK: Experimental study of particle emission characteristics of a heavy-duty diesel engine and effects of after-treatment systems: Selective catalytic reduction, diesel particulate filter, and diesel particulate and NO_x reduction [online] (2012), Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, ISSN 0954-4070. Verfügbar unter: doi:10.1177/0954407012443444

130. KOCH, T.: Entwicklung der Abgasrückführung von Medium-Duty Dieselmotoren zur Einhaltung zukünftiger Emissionsgrenzwerte: Anforderungen, Risiken und Chancen = Development of Exhaust Gas recirculation for Medium-Duty Diesel Engines for Compliance with Future Emission limits: requirements, risks and Opportunities (2006), Haus der Technik Conference, Munich

131. KOCH, T.: Minimalinvasive Meßtechnik zur Bestimmung der innermotorischen Russbildung: Zusammenarbeit mit Kistler AG und ETH Zürich (2009), Kistler-Indiziersymposium, Ostfildern

132. KOCH, T. und U. GÄRTNER: Einfluß und Entwicklung von Zünddruck und Verdichtungsverhältnis von Nfz-Dieselmotoren – Thermodynamischer Wunschtraum und Realität (2005), Velji, A. (Hg) – Der Konflikt zwischen Thermodynamik und Mechanik in der Motorenentwicklung, Essen

133. KOCH, T. und U. GÄRTNER: Analyse konventioneller thermodynamischer Maßnahmen bei NFZ-Dieselmotoren unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit der Abgasnachbehandlung (2007), Heavy duty-, on- und off-highway-Motoren: MTZ-Konferenz Heavy Duty Engines, Augsburg

134. KOCH, T. und U. GÄRTNER: Reduktion der Partikelemission kommerzieller Dieselmotoren – inner- und nachmotorische Potentiale (2007), 7. Dresdner Motorenkolloquium, Dresden

135. KOCH, T. und U. GÄRTNER: Interaktion zwischen thermodynamischen Prozessgrößen des NFZ-Motors und charakteristischen Anforderungen der AGN am Beispiel der Sauerstoffkonzentration (2008), Heavy duty-, on- und off-highway-Motoren: [HDD/Großmotoren-Konferenz], Bonn

136. KOCH, T., U. GÄRTNER und A. DITTLER: Wohin mit der Asche? – Grundlagen der Partikelfiltertechnik im Nutzfahrzeug (2009), 8. Dresdner Motorenkolloquium "Der Dieselmotor im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Schadstoffemission", Dresden

137. KOLTSAKIS, G., O. HARALAMPOUS, C. DEPCIK und J.C. RAGONE: Catalyzed diesel particulate filter modeling [online] (2013), Reviews in Chemical Engineering, ISSN 0167-8299. Verfügbar unter: doi:10.1515/revce-2012-0008

138. KONSTANDOPOULOS, A.G., S. LORENTZOU, C. PAGKOURA, K. OHNO, K. OGYU und T. OYA: Sustained Soot Oxidation in Catalytically Coated Filters [online] (2007), JSAE/SAE International Fuels & Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2007-01-1950

139. KONSTANDOPOULOS, A.G., E. PAPAIOANNOU, D. ZARVALIS, S. SKOPA, P. BALTZOPOULOU, E. KLADOPOULOU, M. KOSTOGLOU und S. LORENTZOU: Catalytic Filter Systems with Direct and Indirect Soot Oxidation Activity [online] (2005), SAE 2005 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2005-01-0670

140. KONSTANDOPOULOS, A.G., D. ZARVALIS und I. DOLIOS: Multi-Instrumental Assessment of Diesel Particulate Filters [online] (2007), SAE World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2007-01-0313

141. KONTSES, A., A. DIMARATOS, C. KERAMIDAS, R. WILLIAMS, H. HAMJE, L. NTZIACHRISTOS und Z. SAMARAS: Effects of fuel properties on particulate emissions of diesel cars equipped with diesel particulate filters [online] (2019), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2019.115879

142. KOZLIK, C., B. GERINGER, A. SCHIRRER und S. JAKUBEK: Dynamic matrix control applied to emission control of a diesel engine [online] (2016), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087415592991

143. KUNTE, S., A. BERTOLA, P. OBRECHT und K. BOULOUCHOS: Temporal soot evolution and diesel engine combustion: Influence of fuel composition, injection parameters, and exhaust gas recirculation [online] (2006), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1243/14680874JER01006

144. KURIMOTO, Y., R. MISHINA, K. KATO, T. AOKI, T. HONDA, A. KANEDA und C.D. VOGT: Next Generation Diesel Particulate Filter for Future Tighter HDV/NRMM Emission Regulations [online] (2022), WCX SAE World Congress Experience. Verfügbar unter: doi:10.4271/2022-01-0545

145. KYRTATOS, P., K. HOYER, P. OBRECHT und K. BOULOUCHOS: Apparent effects of in-cylinder pressure oscillations and cycle-to-cycle variability on heat release rate and soot concentration under long ignition delay conditions in diesel engines [online] (2013), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087413483288

146. KYRTATOS, P., A. ZIVOLIC, C. BRÜCKNER und K. BOULOUCHOS: Cycle-to-cycle variations of NO emissions in diesel engines under long ignition delay conditions [online] (2017), Combustion and Flame, ISSN 00102180. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.combustflame.2016.12.025

147. KYRTATOS, P., A. ZIVOLIC, C. BRUECKNER und K. BOULOUCHOS: The Effect of Cycle-to-Cycle Variations on the NOx-SFC Tradeoff in Diesel Engines under Long Ignition Delay Conditions [online] (2017), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2017-24-0100

148. LAKKIREDDY, V., R.L. MCCORMICK, P. WEBER und S. HOWELL: Diesel Particulate Filter Durability Performance Comparison Using Metals Doped B20 vs. Conventional Diesel Part I: Accelerated Ash Loading and DPF Performance Evaluation [online] (2023), WCX SAE World Congress Experience. Verfügbar unter: doi:10.4271/2023-01-0297

149. LANZERATH, P., U. GÄRTNER, A. MASSNER und A. TRAEBERT: Auswirkungen der katalytischen Desaktivierung auf die Leistungsfähigkeit eines Abgasnachbehandlungssystems mit aktiver DPF-Regenerationsstrategie am Beispiel eines Nfz (2010), VDI Fachkonferenz "Abgasnachbehandlungssysteme 2010", Stuttgart

150. LAPUERTA, M., J.J. HERNANDEZ und F. OLIVA: Strategies for active diesel particulate filter regeneration based on late injection and exhaust recirculation with different fuels [online] (2012), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087412468584

151. LAPUERTA, M., Á. RAMOS, D. FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ und I. GONZÁLEZ-GARCÍA: High-pressure versus low-pressure exhaust gas recirculation in a Euro 6 diesel engine with lean-NOx trap: Effectiveness to reduce NOx emissions [online] (2018), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087418817447

152. LEE, H. und C.J. RUTLAND: Modeling uncontrolled regeneration of diesel particulate filters, taking into account hydrocarbon slip [online] (2012), Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, ISSN 0954-4070. Verfügbar unter: doi:10.1177/0954407012450837

153. LEE, J.H., H.-S. LEE, S. SONG und K.M. CHUN: Experimental Investigation of Soot Oxidation Characteristic with NO2 and O2 using a Flow Reactor Simulating DPF [online] (2007), SAE World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2007-01-1270

154. LEFORT, I., J. HERREROS und A. TSOLAKIS: The Use of a Partial Flow Filter to Assist the Diesel Particulate Filter and Reduce Active Regeneration Events [online] (2014), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2014-01-2806

155. LEHMANN, J., M. ALEKSANDROV und U. GÄRTNER: Entwicklung und Emissionsoptimierung des Nfz-Dieselmotors in stürmischen Zeiten (2019), Konferenzbeitrag, 3. Tagung "Motorische Stickoxid-Bildung", Rust

156. LI, C.G., H. KOELMAN, R. RAMANATHAN, U. BARETZKY, G. FORBRIGER und T. MEUNIER: Particulate Filter Design for High Performance Diesel Engine Application [online] (2009), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2008-01-1747

157. LIANG, X., X. LV, Y. WANG, L. HE, Y. WANG, K. FU, Q. LIU und K. WANG: Experimental investigation of diesel soot oxidation reactivity along the exhaust after-treatment system components [online] (2021), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2021.121047

158. LINDNER, S., A. MASSNER, U. GÄRTNER und T. KOCH: Impact of engine combustion on the reactivity of diesel soot from commercial vehicle engines [online] (2014), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087414563360

159. LIU, H., C. CHAROENPHONPHANICH, P. KARIN, M. SRILOMSAK, S. SRIMANOSAO-WAPAK und K. HANAMURA: Reduction of Diesel Engine's Particulate Matters using Retrofit CeO_2 Diesel Oxidative Catalyst and Partial Flow Diesel Particulate Filter System [online] (2022), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, ISSN 1755-1307. Verfügbar unter: doi:10.1088/1755-1315/1121/1/012017

160. LIU, Z.G., D.R. BERG und J.J. SCHAUER: Detailed Effects of a Diesel Particulate Filter on the Reduction of Chemical Species Emissions [online] (2009), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2008-01-0333

161. LIZARRAGA, L., S. SOUENTIE, A. BOREAVE, C. GEORGE, B. D'ANNA und P. VERNOUX: Effect of diesel oxidation catalysts on the diesel particulate filter regeneration process [online] (2011), Environmental science & technology. Verfügbar unter: doi:10.1021/es2026054

162. LOU, D., Y. CHEN, Y. ZHANG, K. JUE, P. TAN, Z. HU und L. FANG: Analysis of temperature and pressure characteristics in catalyzed diesel particulate filter operation for heavy-duty diesel engine [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2022.125248

163. LYU, L., W. SUN, P. FENG, H. WANG, L. HAO, J. TAN, X. WANG, C. SONG, H. LI, Z. LI, J. WANG und Y. GE: NH_3 and N_2O emission durability of the heavy-duty diesel engine with DOC, DPF, SCR, and ASC through the accelerated aging method [online] (2023), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2022.126950

164. MA, R., C. HE und J. LI: The NO_2 Emission Characteristics of Catalyzed Diesel Particulate Filter Regeneration [online] (2014), SAE 2014 International Powertrain, Fuels & Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2014-01-2820

165. MALLAMO, F., S. LONGHI, F. MILLO und L. ROLANDO: Modeling of diesel oxidation catalysts for calibration and control purpose [online] (2013), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087413492526

166. MAMAKOS, A., D. ROSE, M.C. BESCH, S. HE, R. GIORIA, A. MELAS, R. SUAREZ-BERTOA und B. GIECHASKIEL: Evaluation of Advanced Diesel Particulate Filter Concepts for Post Euro VI Heavy-Duty Diesel Applications [online] (2022), Atmosphere. Verfügbar unter: doi:10.3390/atmos13101682

167. MANIATIS, P., D. ERFORTH, U. WAGNER und T. KOCH: Development of Valve Train Configurations Optimized for Cold Start and Their Effect on Diesel Soot Emission [online] (2019), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2019-24-0161

168. MAO, F. und C.G. LI: Performance Validation of an Advanced Diesel Particulate Filter With High Catalyst Loading Capacity [online] (2005), Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2005-01-3696

169. MARTÍNEZ, J.D., J. RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J. SÁNCHEZ-VALDEPEÑAS, R. MURILLO und T. GARCÍA: Performance and emissions of an automotive diesel engine using a tire pyrolysis liquid blend [online] (2014), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2013.07.051

170. MASSNER, A., U. GÄRTNER und M. KEMMNER: Herausforderungen beim Einsatz von Dieselpartikelfiltern in kombinierten Abgasnachbehandlungssystemen im Nutzfahrzeugbereich – Grundlegende Zusammenhänge der Partikelfilterauslegung und Betriebsstrategie (2010), 6. Internationales AVL Forum Abgas- und Partikel-Emissionen, Ludwigsburg

171. MASSNER, A., U. GÄRTNER und T. KOCH: Die Reaktivität von Dieselruß und die Auswirkungen auf den Betrieb von Abgasnachbehandlungssystemen (2011), 9. FAD Konferenz, Dresden

172. MATHUR, S., J.H. JOHNSON, J. NABER, S.T. BAGLEY und A.S. SHENDE: Experimental Studies of an Advanced Ceramic Diesel Particulate Filter [online] (2008), SAE World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2008-01-0622

173. MATSUNO, M. und T. KITAMURA: Direct Visualization of Soot and Ash Transport in Diesel Particulate Filters during Active Regeneration Process [online] (2019), JSAE/SAE Powertrains, Fuels and Lubricants. Verfügbar unter: doi:10.4271/2019-01-2287

174. MENG, Z., C. CHEN, J. LI, J. FANG, J. TAN, Y. QIN, Y. JIANG, Z. QIN, W. BAI und K. LIANG: Particle emission characteristics of DPF regeneration from DPF regeneration bench and diesel engine bench measurements [online] (2020), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2019.116589

175. MENG, Z., J. LI, J. FANG, J. TAN, Y. QIN, Y. JIANG, Z. QIN, W. BAI und K. LIANG: Experimental study on regeneration performance and particle emission characteristics of DPF with different inlet transition sections lengths [online] (2020), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2019.116487

176. MENG, Z., B. ZENG, J. TAN, Z. CHEN und J. OU: Study of gas and particulate emission characteristics during the fast regeneration period of DPF [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2022.123353

177. MERKISZ, J., J. PIELECHA und W. GIS: Gaseous and Particle Emissions Results from Light Duty Vehicle with Diesel Particle Filter [online] (2009), SAE 2009 Powertrains Fuels and Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-01-2630

178. MICHLER, T., J. DÖRNHÖFER, D. ERFORTH, A. HEINZ, K. SCHEIBER, P. WEBER, N. NOWAK, H. KUBACH, J. MEYER, T. KOCH und A. DITTLER: Comparison of Different Particle Measurement Techniques at a Heavy-Duty Diesel Engine Test Bed [online] (2019), 14th International Conference on Engines & Vehicles. Verfügbar unter: doi:10.4271/2019-24-0158

179. MILLET, J.-B., F. AUBERTIN, C. SAAD, M. LEHR und F. MAROTEAUX: Air System and Diesel Combustion Model for a 4 Cylinder Engine in Real Time Computing Conditions: Application on a EU5 Personal Car with Diesel Particulate Filter [online] (2009), 9th International Conference on Engines and Vehicles. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-24-0136

180. MILLO, F., M. RAFIGH, M. ANDREATA, T. VLACHOS, P. ARYA und P. MICELI: Impact of high sulfur fuel and desulfation process on a close-coupled diesel oxidation catalyst and diesel particulate filter [online] (2017), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2017.01.006

181. MIN, J.-S., C.-Q. LEE, S.-H. KIM, H.-S. JUNG und Y.-W. KIM: Development and Performance of Catalytic Diesel Particulate Filter Systems for Heavy-Duty Diesel Vehicles [online] (2005), SAE 2005 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2005-01-0664

182. MITSOURIDIS, M.A., G. KOLTSAKIS, S. VISWANATHAN, S. GEORGE, E.J. HRUBY, A. KOZLOV, J. PAN, A. PONNAIYAN und W. ZHOU: An experimental and modeling study of ash deposition and migration in diesel particulate filters [online] (2022), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/14680874221108588

183. MIZUTANI, T., S. IWASAKI, Y. MIYAIRI, K. YUUKI, M. MAKINO und H. KURACHI: Performance Verification of Next Generation Diesel Particulate Filter [online] (2010), SAE 2010 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2010-01-0531

184. NAJAR, I., B. STENGEL, B. BUCHHOLZ und E. HASSEL: Pilot Injection and Thermal Nitrogen Oxides: A Numerical and Experimental Study [online] (2020), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/03-13-04-0031

185. NAKAGOSHI, Y., K. MORI, K. TANAKA, Y. FURUTA, T. AOKI, F. YOSHIOKA und K. KATO: New Generation Diesel Particulate Filter for Future Euro7 Regulation [online] (2023), WCX SAE World Congress Experience. Verfügbar unter: doi:10.4271/2023-01-0389

186. NAKAMURA, K., N. VLACHOS, A. KONSTANDOPOULOS, H. IWATA und O. KAZUSHIGE: Performance Improvement of Diesel Particulate Filter by Layer Coating [online] (2012), SAE 2012 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2012-01-0842

187. NAKAMURA, K., A. KONSTANDOPOULOS, M. KOSTOGLOU, T. SHIBATA und Y. HASHIZUME: New Asymmetric Plugging Layout of Diesel Particulate Filters for the Pressure Drop Reduction [online] (2014), SAE 2014 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2014-01-1512

188. NAKAMURA, M. und M. OZAWA: Phenomena of PM Deposition and Oxidation in the Diesel Particulate Filter [online] (2019), JSAE/SAE Powertrains, Fuels and Lubricants. Verfügbar unter: doi:10.4271/2019-01-2288

189. NAKAMURA, M., K. YOKOTA, M. HATTORI und M. OZAWA: Numerical Calculation of PM Trapping and Oxidation of Diesel Particulate Filter with Catalyst by One Dimensional Model [online] (2020), SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-2169

190. NEELY, G.D., J.V. SARLASHKAR und D. MEHTA: Diesel Cold-Start Emission Control Research for 2015-2025 LEV III Emissions [online] (2013), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2013-01-1301

191. NI, P., X. WANG und H. LI: A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines [online] (2020), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2020.118477

192. NICKOLAS, S.G., A.D. WHITE, A.J. KOTRBA und A. YETKIN: Engine Tests of an Active Diesel Particulate Filter Regeneration System [online] (2006), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2006-01-1089

193. NOTHEIS, D., U. WAGNER, T. KOCH, M. OLZMANN, M. RÖßLER, A. VELJI, C. JANZER und F. ZIMMERMANN: Experimental and simulative analysis of the NO2 formation in Diesel engines (2018), Vortrag gehalten auf 13th International AVL Symposium on Propulsion Diagnostics (2018), Baden-Baden, Deutschland, 26.–27. Juni 2018

194. OH, B., P. THAEVIRIYAKUL, W. PHAIROTE, M. SRILOMSAK, C. CHAROENPHONPHANICH, W. PO-NGAEN, S. SRIMANOSAOWAPAK, K. HANAMURA und P. KARIN: Effect of Metallic Microfiber Flow Through Diesel Particulate Filter System on Diesel Engine's Particle Emission Physicochemical Characteristics [online] (2023), Emission Control Science and Technology (Online), ISSN 2199-3629. Verfügbar unter: doi:10.1007/s40825-023-00221-4

195. OKI, H., P. KARIN und K. HANAMURA: Visualization of Oxidation of Soot Nanoparticles Trapped on a Diesel Particulate Membrane Filter [online] (2011), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2011-01-0602

196. OLIVA, A.: Numerische Methoden zur Berechnung der Ölverdünnung bei der Regeneration des Partikelfilters in einem Dieselmotor (2020), München, Alexander Oliva, ISBN 9783943813296

197. OOTAKE, M., T. KONDOU, M. IKEDA, M. DAIGO, M. NAKANO, J. YOKOYAMA und M. MIURA: Development of Diesel Engine System with DPF for the European Market [online] (2007), SAE World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2007-01-1061

198. OTTENWÄLDER, T., T. RAFFIUS, C. SCHULZ, G. GRÜNEFELD, H.-J. KOß und S. PISCHINGER: Fuel effects on NO formation in diesel-like jets in a vessel [online] (2019), Combustion and Flame, ISSN 00102180. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.combustflame.2019.04.053

199. PALMA, V., P. CIAMBELLI, E. MELONI und A. SIN: Catalytic DPF microwave assisted active regeneration [online] (2015), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2014.09.051

200. PARK, S.-Y., K. NARAYANASWAMY, S.J. SCHMIEG und C.J. RUTLAND: A Model Development for Evaluating Soot-NO_x Interactions in a Blended 2-Way Diesel Particulate Filter/Selective Catalytic Reduction [online] (2012), Industrial & Engineering Chemistry Research, ISSN 0888-5885. Verfügbar unter: doi:10.1021/ie3020796

201. PECK, R.S.: Experimentelle Untersuchung und dynamische Simulation von Oxidationskatalysatoren und Diesel-Partikelfiltern [online] (2007), Dissertation, Universität Stuttgart. Verfügbar unter: doi:10.18419/opus-1723

202. PÉLERIN, D., K. GAUKEL, M. HÄRTL und G. WACHTMEISTER: Nitrogen Oxide Reduction Potentials Using Dimethyl Ether and Oxymethylene Ether in a Heavy-Duty Diesel Engine [online] (2020), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-5084

203. PFEIFER, M., M. KÖGEL, P.C. SPURK und G. JESKE: New Platinum/Palladium Based Catalyzed Filter Technologies for Future Passenger Car Applications [online] (2007), SAE World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2007-01-0234

204. PFEIFER, M., M. VOTSMEIER, M. KÖGEL, P.C. SPURK, E.S. LOX und J.F. KNOTH: The Second Generation of Catalyzed Diesel Particulate Filter Systems for Passenger Cars – Particulate Filters with Integrated Oxidation Catalyst Function- [online] (2005), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2005-01-1756

205. PIQUERAS, P., R. BURKE, E.J. SANCHIS und B. DIESEL: Fuel efficiency optimisation based on boosting control of the particulate filter active regeneration at high driving altitude [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2022.123734

206. PISCHINGER, S., T. KÖRFER, A. WIARTALLA, J. SCHNITZLER, D. TOMAZIC und M. TATUR: Combined Particulate Matter and NOx Aftertreatment Systems for Stringent Emission Standards [online] (2007), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2007-01-1128

207. PÖLLMANN, S., M. HÄRTL, M. JAENSCH und G. WACHTMEISTER: Evaluation of strategies to optimize engine efficiency and NOx emissions with the synthetic diesel fuel oxymethylene ether [online] (2023), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/14680874221144807

208. PYSCHOW, C. von, A. GEIßELMANN und C. BEIDL: Minimizing Real Driving Emissions of Heavy-Duty Vehicles – Exhaust Systems and Legislation [online] (2019), ChemBioEng Reviews, ISSN 21969744. Verfügbar unter: doi:10.1002/cben.201900001

209. RAGALLER, P., A. SAPPOK, L. BROMBERG, N. GUNASEKARAN, J. WARKINS und R. WILHELM: Particulate Filter Soot Load Measurements using Radio Frequency Sensors and Potential for Improved Filter Management [online] (2016), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2016-01-0943

210. RECKER, P. und S. PISCHINGER: Thermal Shock Protection for Diesel Particulate Filters [online] (2011), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2011-01-2429

211. REZAEI, R., F. DINKELACKER, B. TILCH, T. DELEBINSKI und M. BRAUER: Phenomenological modeling of combustion and NO_x emissions using detailed tabulated chemistry methods in diesel engines [online] (2016), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087415619302

212. RICOULT, D.: Materials Engineering and New Designs for Robust Cordierite Diesel Particulate Filters [online] (2005), Konferenzbeitrag, SAE Technical Paper Series, SIAT 2005. Verfügbar unter: doi:10.4271/2005-26-024

213. R'MILI, B., A. BORÉAVE, A. MEME, P. VERNOUX, M. LEBLANC, L. NOËL, S. RAUX und B. D'ANNA: Physico-Chemical Characterization of Fine and Ultrafine Particles Emitted during Diesel Particulate Filter Active Regeneration of Euro5 Diesel Vehicles [online] (2018), Environmental science & technology. Verfügbar unter: doi:10.1021/acs.est.7b06644

214. RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J., M. LAPUERTA und J. SÁNCHEZ-VALDEPEÑAS: Regeneration of diesel particulate filters: Effect of renewable fuels [online] (2017), Renewable Energy, ISSN 09601481. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.renene.2016.11.059

215. RÖßLER, M., A. VELJI, C. JANZER, T. KOCH und M. OLZMANN: Formation of Engine Internal NO_2: Measures to Control the NO_2/NO_X Ratio for Enhanced Exhaust After Treatment [online] (2017), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2017-01-1017

216. ROSSOMANDO, B., I. ARSIE, E. MELONI, V. PALMA und C. PIANESE: Experimental Test on the Feasibility of Passive Regeneration in a Catalytic DPF at the Exhaust of a Light-Duty Diesel Engine [online] (2019), 14th International Conference on Engines & Vehicles. Verfügbar unter: doi:10.4271/2019-24-0045

217. ROTHE, D.: Physikalische und chemische Charakterisierung der Rußpartikelemission von Nutzfahrzeugdieselmotoren und Methoden zur Emissionsminderung (2006), Dissertation, Technische Universität München (TUM)

218. ROTHE, D., M. KNAUER, G. EMMERLING, D. DEYERLING und R. NIESSNER: Emissions during active regeneration of a diesel particulate filter on a heavy duty diesel engine: Stationary tests [online] (2015), Journal of Aerosol Science, ISSN 00218502. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jaerosci.2015.07.007

219. SALEHI, R. und R.J. MIDDLETON: Exhaust valve phasing controllers for cold start NO_x emissions reduction in heavy duty diesel engines [online] (2021), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087421996514

220. SAPPOK, A., C. KAMP und V. WONG: Sensitivity Analysis of Ash Packing and Distribution in Diesel Particulate Filters to Transient Changes in Exhaust Conditions [online] (2012), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2012-01-1093

221. SAPPOK, A., Y. WANG, R.-Q. WANG, C. KAMP und V. WONG: Theoretical and Experimental Analysis of Ash Accumulation and Mobility in Ceramic Exhaust Particulate Filters and Potential for Improved Ash Management [online] (2014), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2014-01-1517

222. SAPPOK, A. und V.W. WONG: Ash Effects on Diesel Particulate Filter Pressure Drop Sensitivity to Soot and Implications for Regeneration Frequency and DPF Control [online] (2010), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2010-01-0811

223. SCHAEFER, M., L. HOFMANN, P. GIROT und R. ROHE: Investigation of NOx- and PM-reduction by a Combination of SCR-catalyst and Diesel Particulate Filter for Heavy-duty Diesel Engine [online] (2009), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-01-0912

224. SCHEIBER, K.-M., N. NOWAK, M.L. LORENZ, J. PFEIL, T. KOCH und G. KASPER: Comparison of four diesel engines with regard to blow-by aerosol properties as a basis for reduction strategies based on engine design and operation [online] (2021), Automotive and Engine Technology, ISSN 2365-5127. Verfügbar unter: doi:10.1007/s41104-021-00075-4

225. SCHEJBAL, M., J. ŠTĚPÁNEK, M. MAREK, P. KOČÍ und M. KUBÍČEK: Modelling of soot oxidation by NO_2 in various types of diesel particulate filters [online] (2010), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2010.04.018

226. SCHWENGER, C., U. SPICHER und U. WAGNER: Investigation of the inflow behavior of a Diesel particulate filter using laser-optical measurement techniques during soot loading and filter regeneration with the aim of improving these processes (2010), THIESEL 2010 / Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, Valencia, Spain, September 14-17

227. SEO, J.M., W.S. PARK und M.J. LEE: The Best Choice of Gasoline/Diesel Particulate Filter to Meet Future Particulate Matter Regulation [online] (2012), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2012-01-1255

228. SERRANO, J.R., P. PIQUERAS, E. ANGIOLINI und Ó. GARCÍA-AFONSO: Fuel economy benefits in internal combustion engines due to soot restructuring in the particulate filter by water injection [online] (2022), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/14680874221099898

229. SHARIFIAN, L., Y.M. WRIGHT, K. BOULOUCHOS, M. ELSENER und O. KRÖCHER: Calibration of a model for selective catalytic reduction with ammonia, including NO oxidation, and simulation of NO_x reduction over an Fe–zeolite catalyst under highly transient conditions [online] (2013), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087412437825

230. SHI, Y., Y. LU, Y. CAI, Y. HE, Y. ZHOU und J. FANG: Evolution of particulate matter deposited in the DPF channel during low-temperature regeneration by non-thermal plasma [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2022.123552

231. SHI, Y., Y. ZHOU, Z. LI, Y. HE, J. XIE, Y. YANG und Y. CAI: Effect of Temperature-controlled conditions on the decomposition of particulate matter deposited in the diesel particulate filter channel by treatment with Non-thermal plasma [online] (2023), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2023.128547

232. SINGALANDAPURAM MAHADEVAN, B., J.H. JOHNSON und M. SHAHBAKHTI: Development of a Kalman filter estimator for simulation and control of particulate matter distribution of a diesel catalyzed particulate filter [online] (2018), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087418785855

233. SINGH, M., M. SRILOMSAK, Y. WANG, K. HANAMURA und R. VANDER WAL: Nanostructure changes in diesel soot during NO_2–O_2 oxidation under diesel particulate filter-like conditions toward filter regeneration [online] (2018), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087418807608

234. SOEGER, N., L. MUSSMANN, R. SESSELMANN, G. LEIPPE, C. GIETZELT, O. BAILEY und M. HORI: Impact of Aging and NOx/Soot Ratio on the Performance of a Catalyzed Particulate Filter for Heavy Duty Diesel Applications [online] (2005), SAE 2005 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2005-01-0663

235. SOLTANI, S., R. ANDERSSON und B. ANDERSSON: The effect of exhaust gas composition on the kinetics of soot oxidation and diesel particulate filter regeneration [online] (2018), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2018.02.037

236. SONG, X., J.H. JOHNSON und J.D. NABER: A review of the literature of selective catalytic reduction catalysts integrated into diesel particulate filters [online] (2015), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087414545094

237. SPICHER, U., M. STUMPF, A. VELJI, B. JUNGFLEISCH, R. SUNTZ und H. BOCKHORN: Investigations on soot emission behavior of a common-rail diesel engine during steady and non-steady operating conditions by means of several measuring techniques (2005), SAE Brazil Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, Rio de Janeiro

238. SPICHER, U., U. WAGNER und A. VELJI: Development and Testing of a Diesel Particulate Filter with an Electrical Regeneration Starting Module (2005), SAE International, Proceedings of the Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA

239. SPITERI, A., P. DIMOPOULOS EGGENSCHWILER, Y. LIAO, G. WIGLEY, K.A. MICHALOW-MAUKE, M. ELSENER, O. KRÖCHER und K. BOULOUCHOS: Comparative analysis on the performance of pressure and air-assisted urea injection for selective catalytic reduction of NOx [online] (2015), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2015.08.061

240. SRILOMSAK, M. und K. HANAMURA: Time-lapse visualization of shrinking soot in diesel particulate filter during active-regeneration using field emission scanning electron microscopy [online] (2020), Journal of microscopy. Verfügbar unter: doi:10.1111/jmi.12905

241. SRILOMSAK, M. und K. HANAMURA: A Role of NO_2 on Soot Oxidation in DPFs and Effect of Soot Cake Thickness in Catalyzed DPFs Using Temperature-Programmed Oxidation and Electron Microscopic Visualization [online] (2020), SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, ISSN 2641-9645. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-2201

242. STUMPF, M., S. MERKEL, P. ECKERT, U. WAGNER, A. VELJI, U. SPICHER und O. MOEHLER: Investigation of Soot Concentration and Particle Size Distribution on a Single Cylinder Diesel Engine [online] (2007), ASME 2007 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. Verfügbar unter: doi:10.1115/ICEF2007-1709

243. SUGINO, T., E. TANAKA, H. TRAN und N. AONO: Development of Meshwork DPF Catalyst for Fuel Economy Improvement [online] (2017), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2017-01-0925

244. SUNG, K., J. KIM und R.D. REITZ: Experimental study of pollutant emission reduction for near-stoichiometric diesel combustion in a three-way catalyst [online] (2009), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1243/14680874JER04109

245. SURESH, A., A. YEZERETS, N. CURRIER und J. CLERC: Diesel Particulate Filter System – Effect of Critical Variables on the Regeneration Strategy Development and Optimization [online] (2008), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2008-01-0329

246. TAN, P., Y. CHEN, Z. WANG, L. DUAN, Y. LIU, D. LOU, Z. HU und Y. ZHANG: Experimental study of emission characteristics and performance of SCR coated on DPF with different catalyst washcoat loadings [online] (2023), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2023.128288

247. TAN, P., D. WANG, C. YAO, L. ZHU, Y. WANG, M. WANG, Z. HU und D. LOU: Extended filtration model for diesel particulate filter based on diesel particulate matter morphology characteristics [online] (2020), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2020.118150

248. TENNISON, P., J. SZENTE, M. LOOS, T. KORNISKI und X. ZHANG: Determining Soot Distribution in the Vehicle Exhaust Downstream of a Faulty Diesel Particulate Filter [online] (2013), SAE International Journal of Engines, ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/2013-01-1562

249. TSINOGLOU, D.N. und Z.C. SAMARAS: Malfunctions in Selected Emissions-Related Components of Euro 4 Passenger Cars: Emissions Increase and OBD System Response [online] (2009), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-01-0731

250. TSUJIMOTO, D., J. KUSAKA und T. FUKUMA: Modeling and Controlling Active Regeneration of a Diesel Particulate Filter [online] (2020), SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-2176

251. TSUNEYOSHI, K., O. TAKAGI und K. YAMAMOTO: Washcoat Effect of SiC-Diesel Particulate Filter on Initial PM Filtration Efficiency [online] (2010). Verfügbar unter: doi:10.11351/jsaeronbun.41.1365

252. UENISHI, T., E. TANAKA, T. FUKUMA, J. KUSAKA und Y. DAISHO: A Quasi Two Dimensional Model of Transport Phenomena in Diesel Particulate Filters – The Effects of Particle Diameter on the Pressure Drop in DPF Regeneration Mode- [online] (2016), SAE 2016 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2016-01-2282

253. VALVERDE, V. und B. GIECHASKIEL: Assessment of Gaseous and Particulate Emissions of a Euro 6d-Temp Diesel Vehicle Driven >1300 km Including Six Diesel Particulate Filter Regenerations [online] (2020), Atmosphere. Verfügbar unter: doi:10.3390/atmos11060645

254. VARNA, A., A.C. SPITERI, Y.M. WRIGHT, P. DIMOPOULOS EGGENSCHWILER und K. BOULOUCHOS: Experimental and numerical assessment of impingement and mixing of urea–water sprays for nitric oxide reduction in diesel exhaust [online] (2015), Applied Energy, ISSN 03062619. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apenergy.2015.03.015

255. VIKRAMAN, V., K. ANAND und A. RAMESH: Enhancing the NO_x and soot emissions reduction benefits of a low compression ratio light duty diesel engine by optimization of piston bowl design [online] (2022), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/14680874221082633

256. VISWANATHAN, S., S. GEORGE, M. GOVINDAREDDY und A. HEIBEL: Advanced Diesel Particulate Filter Technologies for Next Generation Exhaust Aftertreatment Systems [online] (2020), WCX SAE World Congress Experience. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-1434

257. WAGNER, U., S. BERLENZ, M. SKUBELLA, O. MÖHLER und H. SAATHOFF: Characterization of Particulate Emissions for a Light Duty EURO-5 Diesel Engine during normal operation as well as DPF-Regeneration (2012), Poster präsentiert auf THIESEL Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Direct Injection Engines, Valencia, Spain, September 11th-14th 2012

258. WAGNER, U.: Experimentelle Untersuchungen außer- und innermotorischer Maßnahmen zur Rußminderung bei Dieselmotoren (2006), Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie

259. WANG, D., J. CAO, P. TAN, Z. WANG, W. LI, Z. LIU und J. WANG: Full course evolution characteristics of DPF active regeneration under different inlet HC concentrations [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2021.122452

260. WANG, D., P. TAN, L. ZHU, Y. WANG, Z. HU und D. LOU: Novel soot loading prediction model of diesel particulate filter based on collection mechanism and equivalent permeability [online] (2021), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2020.119409

261. WARNER, J.R., D. DOBSON und G. CAVATAIO: A Study of Active and Passive Regeneration Using Laboratory Generated Soot on a Variety of SiC Diesel Particulate Filter Formulations [online] (2010), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2010-01-0533

262. WEI, Q., F. ZIEGLER und W. WINKLER: PM Emissions from Light-Duty Diesel Vehicles Retrofitted with Diesel Particulate Filters [online] (2010), SAE 2010 World Congress & Exhibition. Verfügbar unter: doi:10.4271/2010-01-0788

263. WEßLAU, M., M. BARGENDE, S. HAAS, K. BOULOUCHOS, G. BARROSO und A. ESCHER: Homogene Dieselverbrennung – Verfahren zur Emissionsreduzierung [online] (2006), MTZ – Motortechnische Zeitschrift, ISSN 0024-8525. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF03225421

264. WILLIAMS, R., R. DAUPHIN, J. ANDERSSON, P. ZIMAN, J. ROGERSON und H. HAMJE: Fuel Effects on Regulated and Unregulated Emissions from Three Light-Duty Euro 5 and Euro 6 Diesel Passenger Cars [online] (2020), SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, ISSN 2641-9645. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-2147

265. WU, Y., H. LI und G. ANDREWS: Particle Emissions and Size Distribution across the DPF from a Modern Diesel Engine Using Pure and Blended GTL Fuels [online] (2020), SAE Technical Paper Series. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-2059

266. XIAO, G., B. LI, H. TIAN, X. LENG und W. LONG: Numerical study on flow and pressure drop characteristics of a novel type asymmetric wall-flow diesel particulate filter [online] (2020), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2020.117148

267. XIAO, G., Y. WANG, H. ZHANG, W. LONG, D. DONG und B. LI: Numerical study on the regeneration characteristics of catalytic diesel particulate filter based on real driving emissions in plateau environment [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2022.124020

268. XIMINIS, J., A. MASSAGUER, T. PUJOL und E. MASSAGUER: NOx emissions reduction analysis in a diesel Euro VI Heavy Duty vehicle using a thermoelectric generator and an exhaust heater [online] (2021), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2021.121029

269. YAMAMOTO, K. und S. OHORI: Simulations on flow and soot deposition in diesel particulate filters [online] (2012), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087412456687

270. YANAGISAWA, N., K. SHIBATA, K. ENYA und K. SATOU: Transient Behavior of VOCs Emission and Particle Size Distribution during Active Regeneration of Diesel Particulate Filter Equipped Diesel Engine [online] (2011), SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting. Verfügbar unter: doi:10.4271/2011-01-2087

271. YANG, J., M. STEWART, G. MAUPIN, D. HERLING und A. ZELENYUK: Single wall diesel particulate filter (DPF) filtration efficiency studies using laboratory generated particles [online] (2009), Chemical Engineering Science, Richland, WA, USA, ISSN 00092509. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ces.2008.12.011

272. YANG, S., X. YANG, H. LIU, Z. FENG und X. LI: Simulation Analysis of Early and Late Miller Cycle Strategies Influence on Diesel Engine Combustion and Emissions [online] (2020), WCX SAE World Congress Experience. Verfügbar unter: doi:10.4271/2020-01-0662

273. YORK, A.P., T.C. WATLING, M. AHMADINEJAD, D. BERGEAL, P.R. PHILLIPS und D. SWALLOW: Modeling the Emissions Control Performance of a Catalyzed Diesel Particulate Filter (CDPF) System for Light Duty Diesel Applications [online] (2009), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, ISSN 1946-3960. Verfügbar unter: doi:10.4271/2009-01-1266

274. ZENG, X., J.H. LIM, J.W. SCHMOTZER und A. MOHANTY: Active route planning for active diesel particulate filter regeneration [online] (2019), Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, ISSN 0954-4070. Verfügbar unter: doi:10.1177/0954407019892171

275. ZHANG, B., J. E, J. GONG, W. YUAN, W. ZUO, Y. LI und J. FU: Multidisciplinary design optimization of the diesel particulate filter in the composite regeneration process [online] (2016), Applied Energy, ISSN 03062619. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apenergy.2016.08.051

276. ZHANG, X., L. ZHANG, J. LI, X. ZOU, X. JING und W. LI: Combustion and emission characteristics of diesel with different distillation ranges on the China-VI diesel engine [online] (2022), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2022.124876

277. ZHANG, Y., D. LOU, P. TAN und Z. HU: Study of spatial and temporal aging characteristic of catalyzed diesel particulate filter catalytic performance used for diesel vehicle [online] (2020), Scientific reports. Verfügbar unter: doi:10.1038/s41598-020-76634-w

278. ZHAO, X., J. E, G. LIAO, F. ZHANG, J. CHEN und Y. DENG: Numerical simulation study on soot continuous regeneration combustion model of diesel particulate filter under exhaust gas heavy load [online] (2021), Fuel, ISSN 00162361. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fuel.2020.119795

279. ZÖLLNER, C. und D. BRUEGGEMANN: Optical and Analytical Studies on DPF Soot Properties and Consequences for Regeneration Behavior [online] (2017), 13th International Conference on Engines & Vehicles. Verfügbar unter: doi:10.4271/2017-24-0126

280. ZÖLLNER, C., O. HARALAMPOUS und D. BRÜGGEMANN: Effect of engine operating conditions on soot layer permeability and density in diesel particulate filters [online] (2019), International Journal of Engine Research, ISSN 1468-0874. Verfügbar unter: doi:10.1177/1468087419847794

281. EUROPÄISCHE KOMMISSION: EU general risk assessment methodology (Action 5 of Multi-Annual Action Plan for the surveillance of products in the EU (COM(2013)76) [online] (2016), Brüssel. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/docsroom/documents/17107/attachments/1/translations/en/renditions/native [Stand: 27. Dezember 2023]

282. GAUSEMEIER, J., L. KAISER und S. POOK: FMEA von komplexen mechatronischen Systemen auf Basis der Spezifikation der Prinziplösung [online] (2009), Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.110198

283. KANBERGER, P.: Die Methodik der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) (2019), München, GRIN Verlag, ISBN 9783346039729

284. DIN ISO 31000:2018-10, Risikomanagement - Leitlinien (ISO_31000:2018), Beuth Verlag GmbH, Berlin

285. RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: Richtlinie 85/374/EWG des Rates vom 25. Juli 1985 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Haftung für fehlerhafte Produkte (85/374/EWG) [online] (1985), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31985L0374 [Stand: 27. Dezember 2023]

286. DEUTSCHE AKADEMIE DER NATURFORSCHER LEOPOLDINA E.V: Saubere Luft – Stickstoffoxide und Feinstaub in der Atemluft: Grundlagen und Empfehlungen: Ad-hoc-Stellungnahme (2019), Halle (Saale), Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung, ISBN 978-3-8047-4012-9

287. BIRKHOLD, F.: Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden in Kraftfahrzeugen: Untersuchung der Einspritzung von Harnstoffwasserlösung (2007), Aachen, Shaker, Berichte aus der Strömungstechnik, ISBN 978-3-8322-6662-2

288. TISCHER, S., M. BÖRNHORST, J. AMSLER, G. SCHOCH und O. DEUTSCHMANN: Thermodynamics and reaction mechanism of urea decomposition [online] (2019), Physical Chemistry Chemical Chysics: PCCP. Verfügbar unter: doi:10.1039/C9CP01529A

289. KOCH, T.: Diesel – eine sachliche Bewertung der aktuellen Debatte (2018), Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-22210-9

290. TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT, KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE: Projekt: SFB/TRR 150 [online]. Turbulente, chemisch reagierende Mehrphasenströmungen in Wandnähe. Verfügbar unter: https://www.trr150.tu-darmstadt.de/der_sonderforschungsbereich/index.en.jsp [Stand: 13. Dezember 2023]

291. WANG, S., P. ROHLFS, M. BÖRNHORST, A. SCHILLACI, H. MARSCHALL, O. DEUTSCHMANN und M. WÖRNER: Bubble Cutting by Cylinder – Elimination of Wettability Effects by a Separating Liquid Film [online] (2022), Chemie Ingenieur Technik, ISSN 0009-286X. Verfügbar unter: doi:10.1002/cite.202100145

292. ATES, C., M. BÖRNHORST, R. KOCH, M. ECK, O. DEUTSCHMANN und H.-J. BAUER: Morphological characterization of urea derived deposits in SCR systems [online] (2021), Chemical Engineering Journal, ISSN 13858947. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cej.2020.128230

293. BÖRNHORST, M. und O. DEUTSCHMANN: Advances and challenges of ammonia delivery by urea-water sprays in SCR systems [online] (2021), Progress in Energy and Combustion Science, ISSN 03601285. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.pecs.2021.100949

294. KUHN, C., D. SCHWEIGERT, C. KUNTZ und M. BÖRNHORST: Single droplet impingement of urea water solution on heated porous surfaces [online] (2021), International Journal of Heat and Mass Transfer, ISSN 00179310. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121836

295. KUNTZ, C., C. KUHN, H. WEICKENMEIER, S. TISCHER, M. BÖRNHORST und O. DEUTSCHMANN: Kinetic modeling and simulation of high-temperature by-product formation from urea decomposition [online] (2021), Chemical Engineering Science, ISSN 00092509. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ces.2021.116876

296. BÖRNHORST, M., C. KUNTZ, S. TISCHER und O. DEUTSCHMANN: Urea derived deposits in diesel exhaust gas after-treatment: Integration of urea decomposition kinetics into a CFD simulation [online] (2020), Chemical Engineering Science, ISSN 00092509. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ces.2019.115319

297. SCHWEIGERT, D., B. DAMSON, H. LÜDERS, P. STEPHAN und O. DEUTSCHMANN: The effect of wetting characteristics, thermophysical properties, and roughness on spray-wall heat transfer in selective catalytic reduction systems [online] (2020), International Journal of Heat and Mass Transfer, ISSN 00179310. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119554

298. BÖRNHORST, M., X. CAI, M. WÖRNER und O. DEUTSCHMANN: Maximum Spreading of Urea Water Solution during Drop Impingement [online] (2019), Chemical Engineering & Technology, ISSN 0930-7516. Verfügbar unter: doi:10.1002/ceat.201800755

299. BÖRNHORST, M., S. LANGHECK, H. WEICKENMEIER, C. DEM, R. SUNTZ und O. DEUTSCHMANN: Characterization of solid deposits from urea water solution injected into a hot gas test rig [online] (2019), Chemical Engineering Journal, ISSN 13858947. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cej.2018.09.016

300. SCHWEIGERT, D., B. DAMSON, H. LÜDERS, M. BÖRNHORST und O. DEUTSCHMANN: Heat transfer during spray/wall interaction with urea water solution: An experimental parameter study [online] (2019), International Journal of Heat and Fluid Flow, ISSN 0142727X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.108432

301. BÖRNHORST, M. und O. DEUTSCHMANN: Single droplet impingement of urea water solution on a heated substrate [online] (2018), International Journal of Heat and Fluid Flow, ISSN 0142727X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.10.007

302. GÜNTER, T., J. PESEK, K. SCHÄFER, A. BERTÓTINÉ ABAI, M. CASAPU, O. DEUTSCHMANN und J.-D. GRUNWALDT: Cu-SSZ-13 as pre-turbine NOx-removal-catalyst: Impact of pressure and catalyst poisons [online] (2016), Applied Catalysis B: Environmental, ISSN 09263373. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apcatb.2016.06.005

303. SCHMIDT, A., M. BONARENS, I.V. ROISMAN, K. NISHAD, A. SADIKI, A. DREIZLER, J. HUSSONG und S. WAGNER: Experimental Investigation of AdBlue Film Formation in a Generic SCR Test Bench and Numerical Analysis Using LES [online] (2021), Applied Sciences. Verfügbar unter: doi:10.3390/app11156907

304. NISHAD, K., M. STEIN, F. RIES, V. BYKOV, U. MAAS, O. DEUTSCHMANN, J. JANICKA und A. SADIKI: Thermal Decomposition of a Single AdBlue® Droplet Including Wall–Film Formation in Turbulent Cross-Flow in an SCR System [online] (2019), Energies. Verfügbar unter: doi:10.3390/en12132600

305. NISHAD, K., A. SADIKI und J. JANICKA: Numerical Investigation of AdBlue Droplet Evaporation and Thermal Decomposition in the Context of NO_x-SCR Using a Multi-Component Evaporation Model [online] (2018), Energies. Verfügbar unter: doi:10.3390/en11010222

306. RIES, F., Y. LI, K. NISHAD und JANICKA, J., SADIKI, A.: Study of non-equilibrium boundary layers in a generic DEF-injection system using DNS (2018), 12th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (ETMM12)

307. EUROPÄISCHE KOMMISSION: Verordnung (EG) Nr. 215/2007 der Kommission vom 28. Februar 2007 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 1177/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates für die Gemeinschaftsstatistik über Einkommen und Lebensbedingungen (EU-SILC) im Hinblick auf das Verzeichnis der sekundären Zielvariablen für Überschuldung und finanzielle Ausgrenzung (Text von Bedeutung für den EWR) [online] (2007), Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R0215 [Stand: 27. Dezember 2023]

308. EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge [online] (2007), Amtsblatt der Europäischen Union. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R0715 [Stand: 27. Dezember 2023]

309. EICHSLEDER, H., S. HAUSBERGER, M. REXEIS, M. ZALLINGER und R. LUZ: Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3 [online] (2009), TU Graz. Verfügbar unter: https://assets-global.website-files.com/6207922a2acc01004530a67e/625e7fbf0ee7ac6fc3e12fbd_HBEFA_31_Docu_hot_emissionfactors_PC_LCV_HDV.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

310. EICHSLEDER, H., M. REXEIS, S. HAUSBERGER, J. KÜHLWEIN und R. LUZ: Update of Emission Factors for EURO 5 and EURO 6 vehicles for the HBEFA Version 3.2 [online]. Final Report (2013), TU Graz. Verfügbar unter: https://assets-global.website-files.com/6207922a2acc01004530a67e/625e7ef73f2c1259c56737b4_HBEFA32_EF_Euro_5_6_TUG.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

311. EUROPÄISCHE KOMMISSION: Mitteilung über die Anwendung und die künftige Entwicklung der gemeinschaftlichen Rechtsvorschriften über Emissionen von Fahrzeugen für den Leichtverkehr und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen (Euro 5 und Euro 6) [online]. 2008/C182/08 (2008), Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2008:182:0017:0020:DE:PDF [Stand: 27. Dezember 2023]

312. BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: Bericht der Untersuchungskommission „Volkswagen" [online] (2016), Berlin. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/blaetterkatalog/catalogs/235222/pdf/save/bk_1.pdf [Stand: 13. Dezember 2023]

313. HAAN, P. de und M. KELLER: Emission factors for passenger cars and light-duty vehicles [online]. Handbook emission factors for road transport (HBEFA) Version 2.1 (2004), Infras, Bern. Verfügbar unter: https://assets-global.website-files.com/6207922a2acc01004530a67e/625e8765fb2117364a53c7a3_AU_EFA_LMW.pdf [Stand: 27. Dezember 2023]

314. HAUSBERGER, S. und M. REXEIS: Berechnung der Luftschadstoffemissionen des Verkehrs in Österreich gemäß Emissionsfaktoren nach HBEFA 1.1 und HBEFA 2.1. (2006), TU Graz

315. VAN BASSHUYSEN, R. und F. SCHÄFER: Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 5. vollst. überarb. und erw. Aufl. (2009), Wiesbaden, Vieweg+Teuber, ATZ/MTZ-Fachbuch, ISBN 978-3834806994

316. VAN BASSHUYSEN, R. und F. SCHÄFER: Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven (2014), Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-04677-4

317. KURTENBACH, R., J. KLEFFMANN, A. NIEDOJADLO und P. WIESEN: Primary NO_2 emissions and their impact on air quality in traffic environments in Germany [online] (2012), Environmental Sciences Europe, ISSN 2190-4707. Verfügbar unter: doi:10.1186/2190-4715-24-21

318. BRASSEUR, G.P. und D.J. JACOB: Modeling of Atmospheric Chemistry (2017), Cambridge, Cambridge University Press, ISBN 9781107146969

319. JACOB, D.J.: Introduction to Atmospheric Chemistry (1999), Princeton, NJ, Princeton University Press, ISBN 9781400841547

320. ROBERTS–SEMPLE, D., F. SONG und Y. GAO: Seasonal characteristics of ambient nitrogen oxides and ground–level ozone in metropolitan northeastern New Jersey [online] (2012), Atmospheric Pollution Research, ISSN 13091042. Verfügbar unter: doi:10.5094/APR.2012.027

321. WARNECK, P.: Chemistry of the Natural Atmosphere. 2nd ed. (1999), San Diego, Elsevier Science, International Geophysics. v. 71, ISBN 9780080529066

322. FIEDRICH, M., R. KURTENBACH, P. WIESEN und J. KLEFFMANN: Artificial O_3 formation during fireworks [online] (2017), Atmospheric Environment, ISSN 13522310. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.atmosenv.2017.06.028

323. SHAH, V., D.J. JACOB, R. DANG, L.N. LAMSAL, S.A. STRODE, S.D. STEENROD, K.F. BOERSMA, S.D. EASTHAM, T.M. FRITZ, C. THOMPSON, J. PEISCHL, I. BOURGEOIS, I.B. POLLACK, B.A. NAULT, R.C. COHEN, P. CAMPUZANO-JOST, J.L. JIMENEZ, S.T. ANDERSEN, L.J. CARPENTER, T. SHERWEN und M.J. EVANS: Nitrogen oxides in the free troposphere: implications for tropospheric oxidants and the interpretation of satellite NO_2 measurements [online] (2023), Atmospheric Chemistry and Physics. Verfügbar unter: doi:10.5194/acp-23-1227-2023

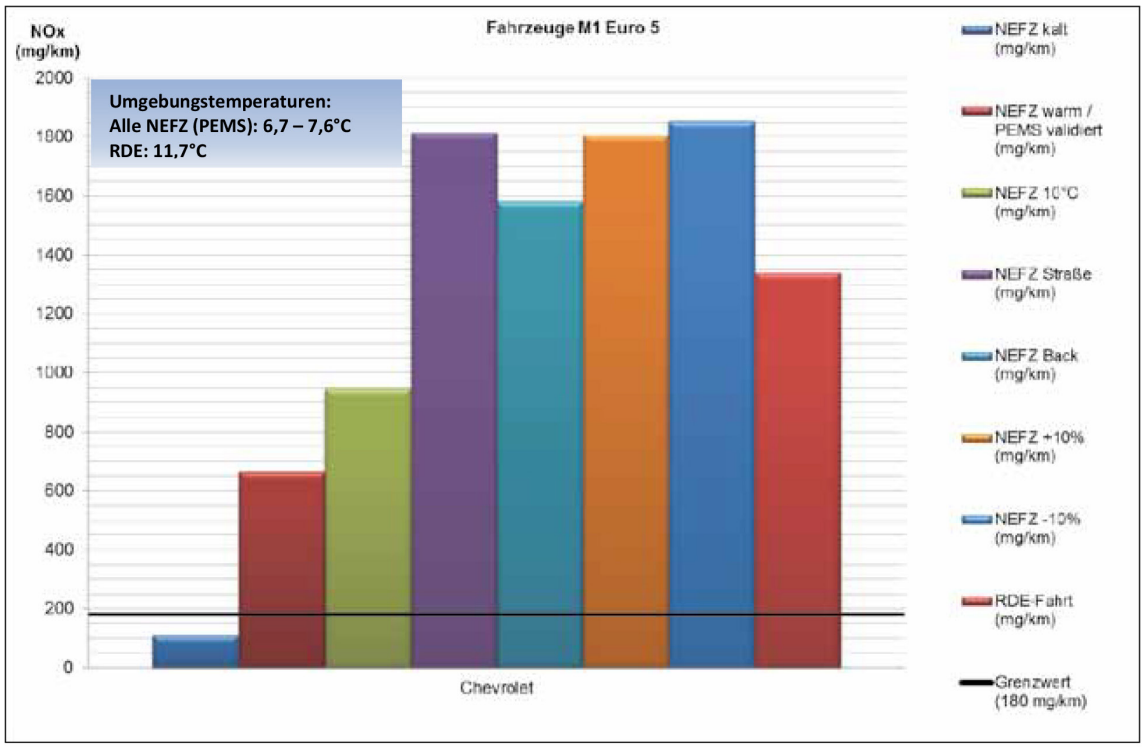
Anhang: Ergänzende Informationen zu Kapitel 1

Ergänzend wird eine Aussage eingeordnet, die im Kontext von Kommentierungen des Technologiestandes von EURO5 Dieselfahrzeugen oft anzutreffen ist.

Auch in richterlichen Ausführungen wird kritisiert, wenn bei EURO5 Fahrzeugen mit einem NO_x-Zyklusgrenzwert von 180 mg/km außerhalb von Zyklusbedingungen Testergebnisse in der Größenordnung von ca. 400 bis 600 mg/km beobachtet werden.

Die WKM begrüßt die kontinuierliche Emissionsverbesserung. Zahlreiche Applikationen nutzten vor der Überarbeitung das NO_x-Emissionsreduktionspotential nicht aus. Jedoch würde je nach Fahrzeug ein Emissionsergebnis bis 2000 mg/km und sogar darüber hinaus resultieren, wenn keine NO_x-Minderungsmaßnahmen eingeleitet werden würden. NO_x-Emissionen in dieser Größenordnung resultieren bei allen typischen EURO5 Dieselfahrzeugen, wenn keine AGR-seitigen oder Einspritzsystem-bedingten Korrekturen erfolgen. Anhang Abbildung 1 zeigt exemplarisch ein typisches Emissionsniveau eines Fahrzeuges, welches mit kaum wirksamen NO_x-Minderungsstrategien betrieben wird. Ebenfalls sind in Kapitel 3 und im Anhang Kapitel 3 NO_x-Emissionsbereiche dargestellt, die auch bei bereits aktiven NO_x-Minderungsstrategien resultieren können.

Ergebnisse von 400 bis 600 mg/km von EURO5 Dieselfahrzeugen beinhalten NO_x-Reduktionsmaßnahmen, sicherlich nicht auf optimalem, jedoch auf einem deutlich wirksamen Niveau.



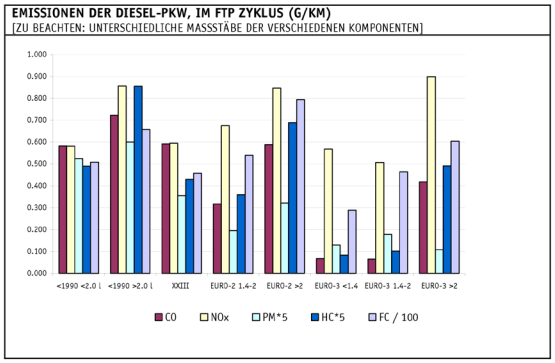
Anhang Abbildung 1: *Exemplarische Darstellung der dieselmotorischen NO_x-Emissionssensitivität am Beispiel des C-Klasse Segment Fahrzeuges Chevrolet Cruz.*

Die Daten sind aus dem Bericht des KBA des damaligen Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI vom April 2016 entnommen und zeigen eine betriebsabhängige Emissionsstreubreite bis ca. 1800 mg/km [312]

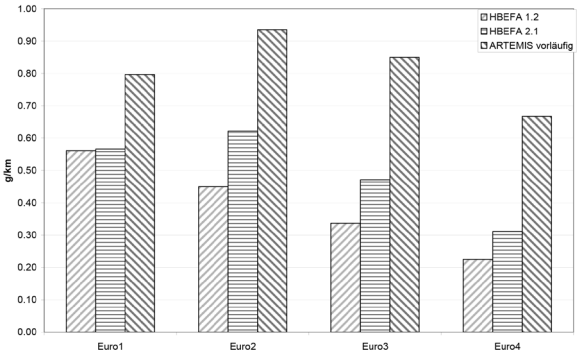
Anhang: Ergänzende Informationen zu Kapitel 3

Das deutsche Umweltbundesamt (UBA) veröffentlicht seit 1995, auch in Partnerschaft mit den vergleichbaren Behörden in der Schweiz (früher BUWAL) und UBA WIEN, das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (siehe Anhang Abbildung 2). Dieses Handbuch ist öffentlich zugänglich und wird von den Behörden für die Analyse der Immissionssituation eingesetzt.

A 2004 Handbuch für Emissionsfaktoren



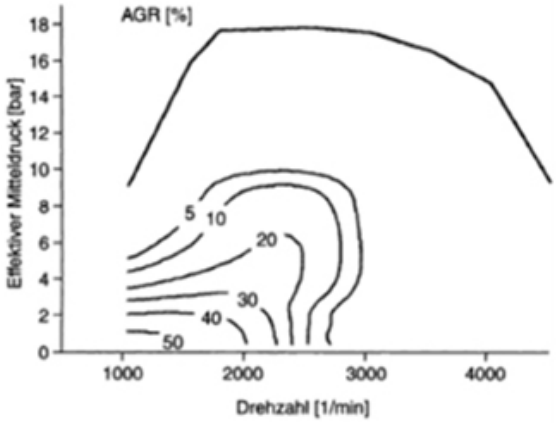
B 2006 Handbuch für Emissionsfaktoren

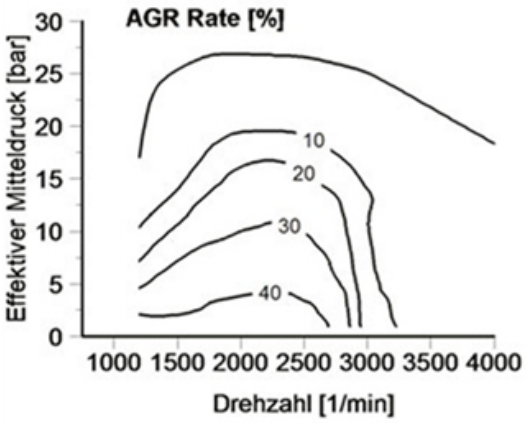


Anhang Abbildung 2: *Ausgewählte Dokumente zwischen 2004 und 2006*

A *EURO3 Dieselrealemissionen (Zyklus: FTP) bis 900 mg/km [313]*
B *EURO4 Dieselrealemissionen (Zyklus: Artemis) bis über 650 mg/km [314]*

Ferner wurde insbesondere in der Fachwelt ausgiebig publiziert und es war bekannt, dass vor allem die Reduzierung der NO_x-Emissionen generell nicht im gesamten Drehzahl- und Lastbereich zur Verfügung steht und somit in vielen Realbetriebszuständen erhöhte NO_x-Emissionen resultieren (siehe Anhang Abbildung 3). Dieses Wissen kann als allgemein bekannt vorausgesetzt werden und war zudem Gegenstand der Lehre in der Universitäts- und Hochschulausbildung für Ingenieure.

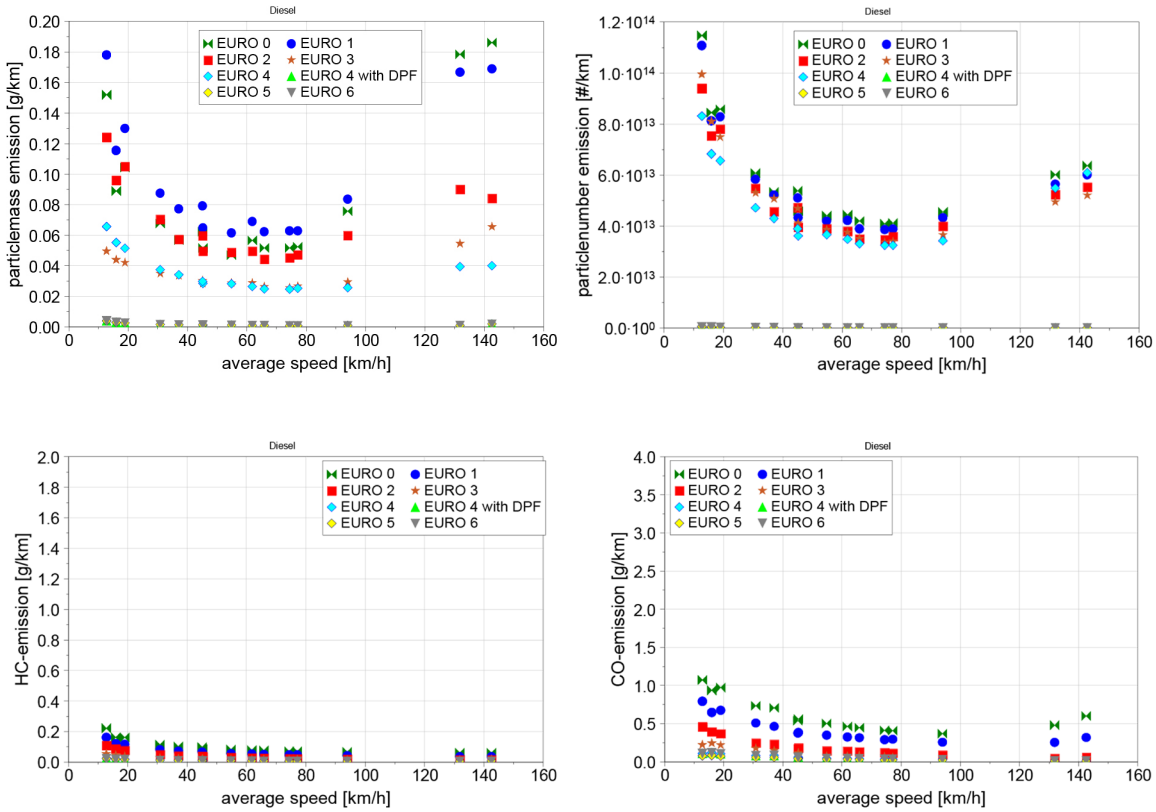




Anhang Abbildung 3: *Literaturbeispiel für dieselmotorische AGR-Regelung*

links: *Fachliteratur 2009 [315]*
rechts: *Fachliteratur 2014 [316]*

Wichtig ist ferner die Kenntnis über die umfassende Dokumentation, dass mit Einführung der Emissionsstufe EURO5 sämtliche verbliebenen weiteren Emissionskomponenten mit Ausnahme der NO_x-Emissionen bereits im Jahr 2009 als weitestgehend immissionsneutral angesehen werden konnten. So sind Partikelmasse PM, Partikelanzahl PN, Kohlenwasserstoffe HC sowie Kohlenmonoxid-Emissionen CO in der Analyse des Jahres 2009 kaum wahrzunehmen (siehe Anhang Abbildung 4). Alle Ergebnisse sind für EURO5 Fahrzeuge auf dem Niveau der Abszisse aufgetragen. Die kombinierte Wirkung einer optimierten motorischen Verbrennung, eines Oxidationskatalysators und eines DPF ermöglichen dieses niedrige Emissionsniveau. Vor allem gegenüber der Emissionsstufe EURO4 wurde durch die Einführung des DPF flottenweit eine deutliche Verbesserung erzielt. In Kombination mit dem dieselmotorischen CO_2-Vorteil verblieb mit EURO5 die weitere Reduzierung der NO_x-Emissionen als wesentliche Herausforderung.



Anhang Abbildung 4: *aus HBEFA31: Entwicklung der dieselmotorische Emissionsreduzierung für verschiedene Emissionsstufen, veröffentlicht 2009 [309]*

oben links: *Partikelmasse PM* ***oben rechts:*** *Partikelanzahl PN*
unten links: *Kohlenwasserstoffe HC* ***unten rechts:*** *Kohlenmonoxid CO*

Anhang: Ergänzende Informationen zu Kapitel 4

Die Erläuterungen im Kapitel 4 wurden zusammen mit PD Dr. J. Kleffmann (Universität Wuppertal) und Prof. Dr. M. Olzmann (Karlsruher Institut für Technologie) erarbeitet.

Entscheidend für die NO_2-Immissionskonzentration, insbesondere innerhalb von Ballungszentren, sind neben den NO_2-Direktemissionen der Fahrzeuge vor allem die NO-Emissionen und deren nachgelagerte Umwandlung zu NO_2 [317][7]. Diese sogenannte sekundäre NO_2-Bildung hängt wesentlich von der sogenannten Oxidationskapazität der Umgebungsluft ab [318–321]. Dabei wird NO sowohl durch atmosphärisches Ozon (O_3) als auch durch Peroxyradikale (HO_2 und RO_2) schnell zu NO_2 gemäß folgender Reaktionen oxidiert:

$NO + O_3$	→	$NO_2 + O_2$	Reaktion 1
$NO + HO_2/RO_2$	→	$NO_2 + OH/RO$	Reaktion 2

Diese Oxidation findet bereits verkehrsnah statt und läuft je nach lokaler NO-, O_3- und Peroxyradikal-Konzentration in einigen zehn Sekunden bis zu wenigen Minuten ab [322].

Insgesamt spielen, wie im Hauptteil bereits ausgeführt, bei der sekundären NO_2-Bildung die meteorologischen Parameter wie turbulente kinetische Energie in der Grenzschicht, Windrichtung und Windstärke eine wichtige Rolle. Besonders relevant sind das atmosphärische Austauschvolumen, charakterisiert durch die sogenannte Grenzschichthöhe, die Temperatur sowie die gesamte Immissionssituation [323]. Insbesondere die Grenzschichthöhe beeinflusst die Verdünnung der in Bodennähe emittierten Bestandteile.

Für die Betrachtung der resultierenden NO_2-Immissionsbelastung sind nun zwei gegenläufige Effekte relevant. Zum einen führt eine niedrige Grenzschichthöhe im Winter zu einer erhöhten NO_x Konzentration. Dies wirkt zunächst NO_2-immissionserhöhend. Gleichzeitig folgt aus der geringeren Oxidationskapazität der Atmosphäre ein geringeres NO_2/NO_x-Verhältnis. Dies wirkt also NO_2-immissionsreduzierend. Diese beiden Effekte werden nachfolgend erläutert und heben sich weitestgehend auf.

NO_2-erhöhend bei niedrigen Temperaturen wirkt zunächst der Effekt der niedrigeren Grenzschichthöhe mit der Folge von erhöhten Immissionskonzentrationen. Die Grenzschichthöhe wiederum wird durch die vertikale turbulente Durchmischung beeinflusst, welche wiederum vor allem durch die Windgeschwindigkeit, die Rauigkeit der Bodenoberfläche aber auch durch konvektiven vertikalen Transport bei Sonneneinstrahlung kontrolliert wird. Niedrige Grenzschichthöhen treten insbesondere in der Nacht aber auch bei niedrigen Temperaturen im Winter auf, was dann zu erhöhten NO_x-Konzentrationen führt.

Aufgrund der erhöhten Sonneneinstrahlung und der photochemischen Bildung von O_3 und Peroxyradikalen ist die Oxidationskapazität der Atmosphäre im Sommer höher als im Winter. Im Umkehrschluss wirkt sich die geringere Oxidationskapazität im Winter zunächst NO_2-reduzierend aus. Wichtig ist zudem die Kenntnis der NO_2-Rohemissionen beziehungsweise die Kenntnis des NO_2/NO_x-Verhältnisses. Während das NO_2/NO_x-Verhältnis (NO_x=NO+NO_2) aus direkten Emissionen einer mittleren deutschen Verkehrsflot-

[7] Die realen Fahrzeugemissionen von NO und NO_2 in der Einheit g/km sind generell deutlich geringer als die im gleichen Test angegebenen NO_x-Messwerte. Der Grund dafür ist, dass für die Bestimmung des Beitrages jedes emittierten NO (30 g/mol) und NO_2 (46 g/mol) Moleküls generell das molekulare Gewicht des schwereren NO_2 verwendet wird. Circa 40 bis 95% der NO_x-Emissionsbestandteile bestehen aber aus dem leichteren NO. Diese Massendefinition ist zum einen in der technischen Herausforderung begründet. Gerade während der Entwicklungszeit von EURO5 war es nicht möglich, NO und NO_2 getrennt im Abgas präzise zu messen. Die Bestimmung via Differenzmethode weist hohe Fehler auf. Zum anderen ist die regulatorische Begründung für diese Massendefinition die nachfolgende Reaktion von NO zu NO_2 mit einer Zeitskala von einigen zehn Sekunden bis zu wenigen Minuten in den Städten und in der Atmosphäre gemäß den Reaktionen 1 und 2.

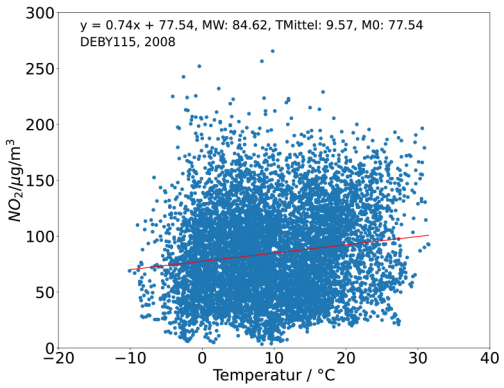
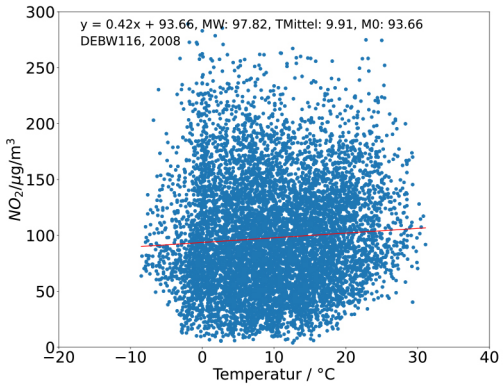
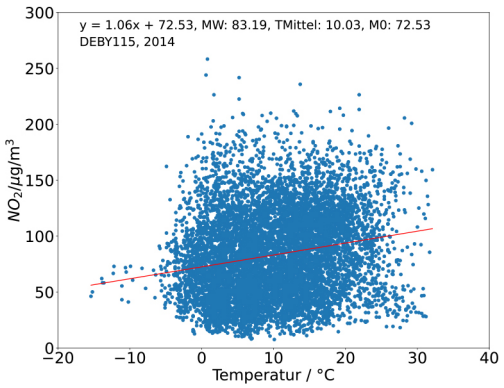
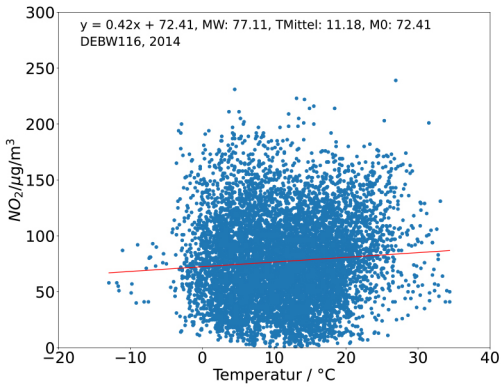
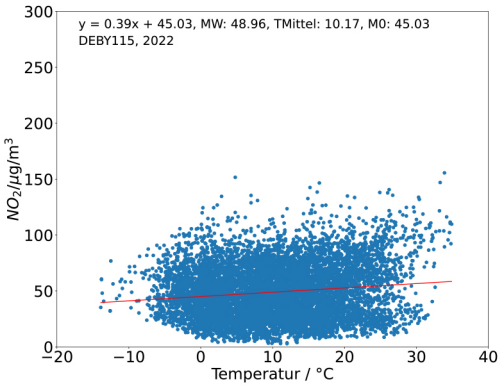
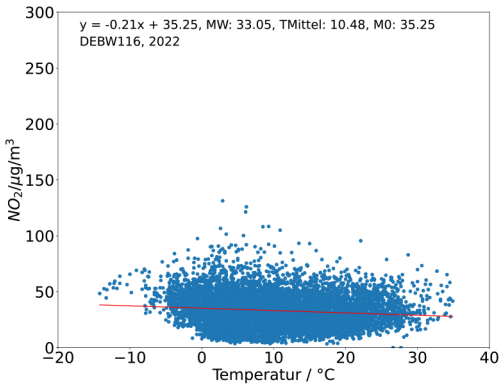
te im Mittel bei 10-15% liegt [317], wobei im Einzelfall natürlich deutlich höhere Werte resultieren können [215], werden verkehrsnah oft NO_2/NO_x-Immissionsverhältnisse von ca. 50 % gemessen, welche dann bei weiterer Verdünnung im urbanen Hintergrund sogar noch deutlich ansteigen. Der Anstieg des NO_2/NO_x-Verhältnisses kann durch die oben beschriebene sekundäre NO_2-Bildung erklärt werden, welche schon verkehrsnah für ca. 2/3 der gemessenen NO_2-Konzentrationen verantwortlich ist [317].

Nun wird im Winter bei niedriger Grenzschichthöhe und somit erhöhter NO Konzentration das Ozon über die Titrationsreaktion (Reaktion 1) in Bodennähe reduziert. Diese Reduzierung der Ozonkonzentration verringert die weitere nächtliche sekundäre NO_2-Bildung in der urbanen Atmosphäre. Dadurch ergeben sich in Summe in der Nacht und im Winter meist kleinere NO_2/NO_x-Verhältnisse als im Sommer.

Auch die Windgeschwindigkeit hat einen Einfluss auf die Immissionskonzentration. Hierbei werden die am Boden emittierten Bestandteile bei hohen Windgeschwindigkeiten schneller mit höheren Luftschichten verdünnt. Daher sind deutlich erhöhte NO_2-Immissionen im Allgemeinen nur bei geringen Windgeschwindigkeiten zu beobachten. Da in Deutschland im Mittel im Winter höhere Windgeschwindigkeiten als im Sommer auftreten, führt dieser Effekt im Winter eher zu geringeren NO_2-Immissionsbelastungen als im Sommer.

Es werden in Summe bei niedrigen Temperaturen mitnichten systematisch erhöhte NO_2-Konzentrationen beobachtet, was hauptsächlich in den gegenläufigen Trends der Grenzschichthöhe und der Oxidationskapazität der Atmosphäre begründet ist. Der nachteilig erhöhten Immission im Winter durch ein geringeres Austauschvolumen der reduzierten Grenzschichthöhe wirken die deutlich geringere Oxidationskapazität der Atmosphäre und höhere Windgeschwindigkeiten wiederum NO_2 reduzierend entgegen.

Die Abbildungen in Kapitel 4 sowie Anhang Abbildung 5 illustrieren Daten des UBA und zeigen bei niedrigen Außentemperaturen keine besonderen Auffälligkeiten oder gar im Mittel relevant erhöhte NO_2-Immissionen.

	München, DEBY115, Landshuter Allee	Stuttgart, DEBW116, Hohenheimer Straße
2008		
2014		
2022		

Anhang Abbildung 5: *NO_2 Immissionsentwicklung über die Jahre 2008, 2014 und 2022 am Beispiel von 2 weiteren Messstationen. Dargestellt sind für jedes Diagramm alle Stundenmittelwerte eines Jahres über den entsprechenden Temperaturen zum jeweiligen Zeitpunkt[8].*

links: *München, Messstation DEBY115, Landshuter Allee*

rechts: *Stuttgart, Messstation DEBW116, Hohenheimer Straße*

[8] Bei Aufzeichnung aller Messpunkte würden in einem Schaltjahr 8784 und in einem Nichtschaltjahr 8760 Messpunkte vorliegen. Vereinzelte Messpunkte sind nicht überliefert worden und fehlen.

Mess-station	Jahr	Lineare Abbildung der NO_2-Jahrestrend-linie über Temperatur T [$\mu g_{NO2}/m^3$]	NO_2 Jahres-mittelwert M_W [$\mu g_{NO2}/m^3$]	Aus Jahres-trendlinie berechnete mittlere NO_2 Konzentra-tion bei 0°C, M_0 [$\mu g_{NO2}/m^3$]	Jahres-tempera-turmittel-wert T_{Mittel} [°C]
Stuttgart, DEBW118, am Neckartor	2008	NO_2 = 0,61·T + 100,33	106,5	100,3	10,0
	2014	NO_2 = 1,01·T + 77,41	88,6	77,4	11,1
	2022	NO_2 = 0,06·T + 36.38	37,0	36,4	10,9
Darmstadt, DEHE040, Hügelstraße	2008	NO_2 = 1,22·T + 52,20	64,9	52,2	10,4
	2014	NO_2 = 1,98·T + 37,20	59,2	37,2	11,1
	2022	NO_2 = 0,25·T + 23,24	26,1	23,2	11,54
Hamburg, DEHH068, Habichtstraße	2008	NO_2 = 0,54·T + 57,01	62,6	57,0	10,2
	2014	NO_2 = 0,79·T + 49,67	58,2	49,7	10,8
	2022	NO_2 = 0,58·T + 31,94	38,1	31,9	10,7
Kiel, DESH027, Bahnhofstraße	2008	NO_2 = 0,32·T + 55,00	58,2	55,2	9,8
	2014	NO_2 = 0,39·T + 32,53	36,6	32,5	10,4
	2022	NO_2 = -0,28·T + 30,30	27,4	30,3	10,6
München, DEBY115, Landshuter Allee	2008	NO_2 = 0,74·T + 77,54	84,6	77,5	9,6
	2014	NO_2 = 1,06·T + 72,53	83,2	72,5	10,0
	2022	NO_2 = 0,39·T + 45,03	49,0	45,0	10,2
Stuttgart, DEBW116, Hohenheimer Straße	2008	NO_2 = 0,42·T + 93,66	97,8	93,7	9,9
	2014	NO_2 = 0,42·T + 72,41	77,1	72,4	11,2
	2022	NO_2 = -0,21·T + 35,25	33,1	35,3	10,5

Anhang Tabelle 1: *NO_2-Immissionsentwicklung für die Jahre 2008, 2014 und 2022; analytische Darstellung der linearen Regression (Trendlinie[9], in den Abbildungen 2, 3 und Anhang 5 in rot dargestellt) als Funktion der Temperatur für insgesamt 18 Jahresanalysen (6 Messstationen in 3 Jahren) inklusive NO_2-Jahresmittelwert M_W, mittlere NO_2-Konzentration bei 0°C M_0 sowie mittlere Jahrestemperatur T_{Mittel}*

[9] Die lokale NO_2-Immissionsbelastung hängt zu jedem Zeitpunkt von Verkehrsdichte, Verkehrsfluss, Verkehrszusammensetzung, Windsituation, Lage der Messstation, Umgebungsbedingungen der Messstation etc. ab. Daher kann mit der Trendlinie nicht die genaue NO_2-Immissionshöhe als Funktion der Außentemperatur bestimmt werden. Die Trendlinie für eine relevante Anzahl an Datenpunkten (>8000 pro Jahr) dokumentiert jedoch, dass es bei niedrigen Temperaturen keine statistischen Auffälligkeiten der NO_2-Immission bei niedrigen Temperaturen gibt.

Anhang: Abkürzungen

Adblue Betriebsstoff der SCR-Katalyse, definiert gemäß DIN 70070, der zu 32,5 % aus Harnstoff und ferner aus demineralisiertem Wasser besteht. Adblue wird durch temperaturabhängige Thermolyse- und Hydrolysevorgänge im Abgastrakt zu Ammoniak (NH_3) aufbereitet.

AGR Abgasrückführung; das aus dem Motor austretende Abgas wird wieder dem Frischgemisch zugeführt. Typischerweise erfolgt eine Kühlung über einen AGR-Kühler. Man unterscheidet zwischen Hochdruckabgasrückführung HD-AGR bei einer Verbindung der Positionen vor der Turbine des Turboladers und vor dem Einlassbereich des Motors und Niederdruckabgasrückführung ND-AGR bei einer Verbindung nach dem DPF und vor dem Verdichter des ATL.

ATL Abgasturbolader; treibt mit Hilfe des Enthalpiestroms des Abgases über die Turbine den Verdichter zur Aufladung des Frischgemisches an. Der Ladedruck kann oberhalb des Umgebungsdruckes liegen.

BMDV Bundesministerium für Digitales und Verkehr

DPF Dieselpartikelfilter; Substrat der Abgasnachbehandlung mit der Funktion der Partikelfiltration. Die Durchströmung des porösen Substrates führt zur Filtration der Partikel.

CADC Testzyklus Common Artemis Driving Cycle; ein realitätsnaher Fahrzyklus, der nicht für die Fahrzeugzulassung verwendet wurde.

CLD Chemilumeneszenzdetektor; CLD dienen zur Messung der NO-Konzentration einer vorliegenden Gasprobe. Der NO_2 Anteil des Messgases muss vor der CLD Messung durch einen Konverter zu NO reduziert werden.

FTP Federal Test Procedure; Testzyklus der amerikanischen Umweltbehörde EPA

HBEFA Handbuch für Emissionsfaktoren; in regelmäßigen Abständen sind durch das UBA beauftragte Datenbanken und Publikationen im Kontext des Emissionsverhaltens von Fahrzeugen veröffentlicht worden.

HO_2 Peroxyradial, reaktive Spezies, die auch in der Umgebungsluft vorkommt.

KBA Kraftfahrt-Bundesamt; Bundesoberbehörde für Straßenverkehr, das KBA gehört zum Geschäftsbereich des BMDV.

MIL Malfunction indicator light; Motorkontrollleuchte

NH_3 Ammoniak; NH_3 wird zur Reduktion der Stickstoffoxidemissionen im SCR Katalysator benötigt.

NO Stickstoffmonoxid; ein Großteil der NO_x Emissionen fällt typischerweise als NO an.

NO_2 Stickstoffdioxid; ein kleinerer Anteil der NO_x Emissionen fällt als NO_2 an. Durch nachgelagerte Oxidation werden auch die NO Direktemissionen mit einem Zeitversatz zu NO_2.

OBD Onboard Diagnose; die OBD ist eine verbindliche Technologielösung zur frühzeitigen Detektion von Fahrzeugfehlern, insbesondere des Emissionskontrollsystems.

O_3 Ozon; O_3 wirkt als reaktionsfreudiger Oxidationspartner, vor allem bei der NO_2-Bildung.

RO_2 Peroxyradikal; reaktive Spezies, die auch in der Umgebungsluft vorkommt.

SCR Selektive katalytische Reaktion; mit Hilfe von NH_3, das aus Adblue resultiert, können bei ausreichend hoher Temperatur (180°C-200°C) NO_x-Emissionen reduziert werden.

SDPF Kombinierte SCR-Katalyse durch SCR-Beschichtung des DPF mit der Konsequenz niedriger lokaler NO und NO_2 Konzentrationen im DPF und einem resultierenden, deutlich beschleunigten Rußaufbau im DPF.

UBA Umweltbundesamt; das UBA ist eine Behörde des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz.

Unterschriften

Herausgegeben wird diese Stellungnahme von der Wissenschaftliche Gesellschaft für Kraftfahrzeug- und Motorentechnik e.V. (WKM). Für den fachlichen Inhalt zeichnen die unten aufgeführten WKM Mitglieder sowie Vertreter von Hochschulen verantwortlich.

Prof. Dr.-Ing Henning Wallentowitz (i.R.)
bis Aug. 2008
Institut für Kraftfahrtwesen Aachen
RWTH Aachen University
Steinbachstr. 7
52074 **Aachen**

Prof. Dr. Rainer Wieler
Technische Hochschule Augsburg
Professur für Verbrennungsmotoren
und Fahrzeugtechnik
An der Hochschule 1
86161 **Augsburg**

Prof. Dr.-Ing. Helmut Pucher (i.R.)
TU Berlin
Institut für Verbrennungskraftmaschinen
Carnotstr. 1A
10587 **Berlin**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Eifler (i.R.)
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren
Gebäude IC 2/129
Universitätsstraße 150
44801 **Bochum**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Technische Universität Braunschweig
Institut für Verbrennungskraftmaschinen
Hermann-Blenk-Straße 42
38108 **Braunschweig**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay (i.R.)
Technische Universität Braunschweig
Institut für Fahrzeugtechnik
Hans-Sommer-Str. 4
38106 **Braunschweig**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralph Mayer
Technische Universität Chemnitz
Professur Fahrzeugsystemdesign
09107 **Chemnitz**

Prof. Dr. Hartmut Gnuschke
Hochschule für angewandte
Wissenschaften Coburg
Institut für Angewandte Wissenschaft
Friedrich-Streib-Straße 2
96450 **Coburg**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. techn. Christian Beidl
Technische Universität Darmstadt
Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Fahrzeugantriebe
Otto-Berndt-Straße 2
64287 **Darmstadt**

Prof. em. Dr.-Ing. Günter Hohenberg (i.R.)
Technische Universität Darmstadt
Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Fahrzeugantriebe
Otto-Berndt-Straße 2
64287 **Darmstadt**

Prof. Dr.-Ing. Steven Peters
Technische Universität Darmstadt
Institut für Fahrzeugtechnik (FZD)
Otto-Berndt-Straße 2
64287 **Darmstadt**

Prof. Dr.-Ing. Gennadi Zikoridse
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik
Professur Kraftfahrzeugtechnik/Antriebstechnik
Friedrich-List-Platz 1
01069 **Dresden**

Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker
Institut für Technische Verbrennung
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 1 – Gebäude 8141
30823 **Garbsen**

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
Technische Universität München
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM)
Boltzmannstr. 15
85748 **Garching**

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.
Helmut Eichlseder
Technische Universität Graz
Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik
Inffeldgasse 19
8010 **Graz**

Prof. Dr.-Ing. Peter Kuhlmann (i.R.)
Helmut-Schmidt-Universität/
Universität der Bundeswehr Hamburg
Institut für Fahrzeugtechnik und
Antriebssystemtechnik (IFAS)
Holstenhofweg 85
22043 **Hamburg**

Univ.- Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Thiemann (i.R.)
Helmut-Schmidt-Universität/
Universität der Bundeswehr Hamburg
Institut für Fahrzeugtechnik und
Antriebssystemtechnik (IFAS)
Holstenhofweg 85
22043 **Hamburg**

Prof.-Dr.-Ing. Karsten Wittek
Heilbronn University of Applied Science
Max-Planck-Strasse 39
74081 **Heilbronn**

Prof. Dr.-Ing. Bernd Bartunek
Fachhochschule Südwestfalen
Institut für Fahrzeugantriebtechnik
(IFAT)
Frauenstuhlweg 31
58644 **Iserlohn**

Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Hannibal
Fachhochschule Südwestfalen, Iserlohn
Studiengangsprecher Automotive
Frauenstuhlweg 31
58636 **Iserlohn**

Prof. Dr.-Ing. R. Flierl (i.R.)
Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Antriebe in der Fahrzeugtechnik
Fachbereich Maschinenbau und
Verfahrenstechnik
Gottlieb-Daimler-Str. 44/568
67663 **Kaiserslautern**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Günthner
Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Antriebe in der Fahrzeugtechnik
Fachbereich Maschinenbau und
Verfahrenstechnik
Gottlieb-Daimler-Str. 44/568
67663 **Kaiserslautern**

Prof. Dr. Maurice Kettner
GenLab – Gas Engine Laboratory
Hochschule Karlsruhe (HKA)
Moltkestr. 30
76133 **Karlsruhe**

Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch
Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Kolbenmaschinen
Rintheimer Querallee 2
76131 **Karlsruhe**

Prof. Dr.-Ing Ulrich Spicher (i.R.)
Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Kolbenmaschinen
Rintheimer Querallee 2
76131 **Karlsruhe**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Rottengruber
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Institut für Mobile Systeme
Postfach 4120
39016 **Magdeburg**

Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.
Helmut Tschöke (i.R.)
Otto-von-Guericke-Universität
Universitätsplatz 2
39106 **Magdeburg**

Prof. Dr. Malte Jaensch
Technische Universität München
Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile
Antriebssysteme
Schragenhofstr. 31
80992 **München**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister (i.R.)
Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen
Schragenhofstraße 31
80992 **München**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz
Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und
Schiffstechnik
Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und
Verbrennungsmotoren
Albert-Einstein-Straße 2
18059 **Rostock**

Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf (i.R.)
Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und
Verbrennungsmotoren
Albert-Einstein-Straße 2
18059 **Rostock**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Steinberg (i.R.)
Lehrstuhl Fahrzeugtechnik und -antriebe
Brandenburgische Technische Universität
Cottbus-Senftenberg Universitätsplatz 1
01968 **Senftenberg**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende (i.R.)
Universität Stuttgart
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen (IVK)
Pfaffenwaldring 12
70569 **Stuttgart**

Prof. Dr.-Ing. André Casal Kulzer
Universität Stuttgart
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen (IVK)
Pfaffenwaldring 12
70569 **Stuttgart**

Univ.-Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer
Technische Universität Wien
Institut für Fahrzeugantriebe und
Automobiltechnik
Getreidemarkt 9
1060 **Wien**

Prof. Dr. sc. techn.
Konstantinos Boulouchos (i.R.)
ETH Zürich
Laboratorium für Aerothermochemie
und Verbrennungssysteme
Institut für Energietechnik
8092 **Zürich**

Prof. Dr.-Ing. habil Jörn Getzlaff
Professur für Antriebstechnik und
Fahrzeugkonzepte
Westsächsische Hochschule Zwickau
Postfach 201037
08012 **Zwickau**

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Walther
Westsächsische Hochschule Zwickau
Professur Kraftfahrzeugmotoren
Scheffelstraße 39
08066 **Zwickau**