

Proceedings

ATZ live

Alexander Heintzel *Hrsg.*

Internationaler Motorenkongress 2022

Mobilität und Fahrzeugkonzepte von
morgen

 Springer Vieweg

Proceedings

Ein stetig steigender Fundus an Informationen ist heute notwendig, um die immer komplexer werdende Technik heutiger Kraftfahrzeuge zu verstehen. Funktionen, Arbeitsweise, Komponenten und Systeme entwickeln sich rasant. In immer schnelleren Zyklen verbreitet sich aktuelles Wissen gerade aus Konferenzen, Tagungen und Symposien in die Fachwelt. Den raschen Zugriff auf diese Informationen bietet diese Reihe Proceedings, die sich zur Aufgabe gestellt hat, das zum Verständnis topaktueller Technik rund um das Automobil erforderliche spezielle Wissen in der Systematik aus Konferenzen und Tagungen zusammen zu stellen und als Buch in Springer.com wie auch elektronisch in Springer Link und Springer Professional bereit zu stellen. Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die aktuelles Fachwissen im Zusammenhang mit Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes suchen. Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik finden hier die Zusammenstellung von Veranstaltungen, die sie selber nicht besuchen konnten. Gutachtern, Forschern und Entwicklungsingenieuren in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie Dienstleistern können die Proceedings wertvolle Antworten auf topaktuelle Fragen geben.

Today, a steadily growing store of information is called for in order to understand the increasingly complex technologies used in modern automobiles. Functions, modes of operation, components and systems are rapidly evolving, while at the same time the latest expertise is disseminated directly from conferences, congresses and symposia to the professional world in ever-faster cycles. This series of proceedings offers rapid access to this information, gathering the specific knowledge needed to keep up with cutting-edge advances in automotive technologies, employing the same systematic approach used at conferences and congresses and presenting it in print (available at Springer.com) and electronic (at Springer Link and Springer Professional) formats. The series addresses the needs of automotive engineers, motor design engineers and students looking for the latest expertise in connection with key questions in their field, while professors and instructors working in the areas of automotive and motor design engineering will also find summaries of industry events they weren't able to attend. The proceedings also offer valuable answers to the topical questions that concern assessors, researchers and developmental engineers in the automotive and supplier industry, as well as service providers.

Alexander Heintzel
(Hrsg.)

Internationaler Motorenkongress 2022

Mobilität und Fahrzeugkonzepte von
morgen

Hrsg.
Alexander Heintzel
Springer Fachmedien Wiesbaden
Wiesbaden, Deutschland

ISSN 2198-7432

ISSN 2198-7440 (electronic)

Proceedings

ISBN 978-3-658-44739-7

ISBN 978-3-658-44740-3 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-44740-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Ralf Harms

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Vorwort

HERZLICH WILLKOMMEN, LIEBE KONGRESSTEILNEHMER

Der Klimaschutz steht mehr denn je an zentraler Stelle der gesellschaftlichen, politischen und industriellen Diskussion unserer Volkswirtschaften. Ein wesentlicher Beitrag muss durch den möglichst raschen Verzicht auf die weltweit dominierenden fossilen Energieträger erfolgen.

Wasserstoff, biomasse- und strombasierte synthetische Kraftstoffe bieten ein hervorragendes Potenzial, die vorhandene Infrastruktur und die weltweit in Milliarden Stückzahl betriebenen Fahrzeuge und Arbeitsmaschinen mit Verbrennungsmotoren kurzfristig in eine defossilisierte Welt zu überführen. Im Bereich der Mobilität steht der Verbrennungsmotor mit nicht-fossilen Kraftstoffen nicht im Wettbewerb zu rein elektrischen Antrieben.

Der Internationale Motorenkongress führt auch 2022 in seinem einzigartigen Konzept den aktuellen technologischen Wissensstand des Gesamtsystems nicht-fossiler Kraftstoffe und Verbrennungsmotoren und deren ganzheitlicher Bewertung auf den Klimaschutz zusammen.

Sichern Sie sich Ihren Wissensvorsprung und profitieren Sie!

- Es erwarten Sie internationale Referenten, hochkarätige Vorträge und Diskussionsrunden.
- Nutzen Sie den Kongress zum Netzwerken – der Abend der Motoren-Community bietet interessante Gespräche in ungezwungener Atmosphäre.
- Eine begleitende Fachausstellung informiert über innovative Produkte und Dienstleistungen im Bereich Verbrennungsmotorenentwicklung.

Wir freuen uns auf Ihre Teilnahme!

Im Namen der Programmbeiräte

Prof. Dr. Peter Gutzmer
Wissenschaftlicher Leiter des Kongresses,
Herausgeber ATZ | MTZ-Gruppe

Foreword

A WARM WELCOME TO ALL PARTICIPANTS

More than ever before, climate protection is at the center of the social, political, and industrial discussion in our economies. A major contribution must be made by abandoning fossil fuels, which are currently the world's dominant source of energy, as quickly as possible.

Hydrogen and synthetic fuels based on biomass and electricity offer excellent potential for quickly transferring the existing infrastructure, together with the billions of vehicles and machines that use internal combustion engines, to a defossilized world. In the mobility sector, the internal combustion engine running on non-fossil fuels is not in competition with all-electric drive systems.

With its unique concept, the International Engine Congress will once again in 2022 bring together the current state of technological knowledge of the overall system of non-fossil fuels and internal combustion engines and a holistic assessment of this system with regard to climate protection.

Stay abreast of current trends and benefit from a lead in knowledge!

- You can expect international speakers as well as top-level presentations and panel discussions.
- The congress is a great opportunity to “network“ – the evening event for the engine community offers stimulating discussions in an informal atmosphere.
- The trade exhibition, held in parallel, provides ample information about innovative products and services in the field of combustion engine development.

We look forward to your participation.

On behalf of the program advisory boards

Prof. Dr. Peter Gutzmer
Scientific Director of the Congress,
Editor-in-Charge ATZ | MTZ Group

Tagungsbericht

Stimmen vom Internationalen Motorenkongress 2022 in Baden-Baden, Deutschland

Der 9. Internationale Motorenkongress fand am 22. und 23. Februar als hybride Veranstaltung mit der Möglichkeit zur Online- oder Präsenzteilnahme in Baden-Baden statt. Experten aus Industrie, Forschung und Verbänden diskutierten die drängenden Themen rund um die Rolle des Verbrennungsmotors in einer klimaneutralen Zukunft.

GUTZMER _ Es war richtig toll und wertvoll, in Präsenz zusammenzukommen, weil die Möglichkeit zum auch kontroversen Gesprächsaustausch mit Kollegen neben den aktuellen Präsentationen ein ganz essenzieller Bestandteil einer solchen Veranstaltung ist. Ja, wir können virtuell arbeiten, das bleibt aber doch ein sehr anonymer Austausch.

Wir sprachen auf diesem Kongress ganz klar über die aktuellen Fokusthemen Klimaschutz und die Verkehrswende. Und wir konnten deutlich erkennen, dass die Verkehrswende nicht gleichbedeutend mit E-Mobilität ist, sondern gleichbedeutend mit Energiewende weg von den fossilen Energieträgern. Diesen Umstand müssen wir noch viel stärker in die Öffentlichkeit, zu den Politikern und den Verantwortlichen der Industrie tragen. Ja, wir müssen defossilisieren. Das bedeutet, dass wir uns von jenem Energieträger so schnell wie möglich verabschieden müssen, der uns Wohlstand und Bewegungsfreiheit gebracht hat und ohne den viele Industriezweige sowie die heutige Mobilität insgesamt nicht möglich gewesen wäre. Die Elektrifizierung ist auf Basis einer regenerativen Energieerzeugung ganz klar ein Weg, den niemand infrage stellt. Allerdings ist ihre direkte Nutzung über Batterien in der individuellen Mobilität eben nicht der einzige Weg und nicht die Lösung für alle. Die Erneuerung der Bestandsflotte und der erforderliche Infrastrukturaufbau gehen viel zu langsam vonstatten und nur darauf zu setzen, ist deutlich zu wenig, um CO₂-Emissionen erheblich zu senken, die Temperaturziele einzuhalten und so einen effektiven Klimaschutz entsprechend den gesetzlich verankerten Zielen umzusetzen. Ein Pfad ausschließlich genügt nicht, genauso wenig wie die alleinige Tank-to-Wheel-Bewertung. Gerade in der politischen Bewertung findet der umfassende ganzheitliche Ansatz zum Restbudget der noch zulässigen globalen CO₂-Emission zum 1,5-Grad-Ziel viel zu wenig Beachtung. Wir erkennen, dass es unter diesen Aspekten viel bedeutender ist, die riesige

Fahrzeug-Bestandsflotte über strom- und biomasse-basierte Energieträger als Teil der Lösung miteinzubinden und nicht nur den Flug und Schiffverkehr. Deutschland wird nicht energieautark werden, selbst Europa wird sich schwer tun. Wir werden Energie weiterhin importieren und benötigen neben Wasserstoff verschiedene weitere defossilisierte aber molekulare Energieträger für die zahlreichen Anwendungen. Der dazu vorteilhafte Energiewandler ist dann eben nicht die E-Maschine, sondern die Verbrennungskraftmaschine.

Ich betone es nochmal: Die E-Mobilität wird nicht infrage gestellt, aber sie wird nicht reichen, auch nicht durch Effizienzsteigerungen, um in der kompletten Anwendungsvielfalt und Kundenakzeptanz die Klimaschutzziele in Deutschland oder Europa in der dringend erforderlichen Geschwindigkeit zu realisieren. Zudem wird man im globalen Wettbewerb nicht bestehen, wenn man nur auf ein Pferd setzt, auch wenn das manche in ihrer Einfachheit glauben. Innovative Lösungen entstehen nicht durch Verbote oder einseitige Förderungen, sondern durch technologischen Wettbewerb im entsprechenden gesetzlichen Rahmen. Und wir brauchen die Leuchttürme des Handelns wie Porsche, aber auch Bosch, VW, Shell oder Neste hier beispielhaft gezeigt haben.

BEIDL _ Die Antriebsdiversifizierung ist im Nutzfahrzeugbereich so offenkundig notwendig wie nirgendwo sonst. Wasserstoff, E- und Bio-Fuels, synthetisches Methan, Ammoniak und natürlich Strom werden für die unterschiedlichsten Anwendungen benötigt. Als Faustregel gilt: Je kürzer und planbarer die Einsatzstrecke, desto eher können vollelektrische Fahrzeuge eingesetzt werden. Auf der Langstrecke wird die Umsetzung schon allein aufgrund der höheren Kosten und des Gewichts eines elektrischen Antriebs mit Batterien und des damit verbundenen Anstiegs der TCO schwierig – vom Aufbau einer eigenen Ladeinfrastruktur mit hochleistungsfähigen Ladesäulen ganz zu schweigen. Im Flugverkehr und der Schifffahrt werden zumindest mittelfristig andere Technologiepfade verfolgt als die Elektrifizierung. Auch im Off-Highway-Bereich, in dem oftmals die Energieversorgung zur Maschine kommt und nicht anders herum, sind Hersteller und Betreiber trotz des enormen Engagements und viel Einfallsreichtum skeptisch, ob eine vollständige Elektrifizierung gelingen könnte. Deutz etwa entwickelt eigene Großbatterien und setzt je nach Einsatzort von Maschinen auch auf die Rückverstromung von Wasserstoff in Aggregaten, um beispielsweise Baufahrzeuge mit Energie zu versorgen. Maschinenhersteller Liebherr versucht, die Anwendungsgebiete und Antriebstechnologien ganzheitlich auf den Kunden zuzuschneiden, und geht damit das große Risiko ein, alle möglichen Energiewandlungskonzepte gleichzeitig und in geringen Stückzahlen umsetzen zu müssen. Es ist deutlich erkennbar, dass die zukünftige Motorenentwicklung sehr stark vom Spannungsfeld zwischen Emissionsregularien und Nutzungsanforderungen geprägt wird. Ein Beispiel ist der intensiv diskutierte Wasserstoffmotor, der ein wesentlicher Bestandteil für die Umsetzung der Wasserstoffstrategie im Nutzfahrzeugbereich sein wird. Hier wurden bemerkenswerte Fortschritte präsentiert.

DUMS _ Wir können nicht warten – das war das Credo der Industrie im Kraftstoffstrang des Kongresses. Deshalb schaffen einige Firmen Fakten,

obwohl die Gesetzgebung nach wie vor die so dringend benötigten verlässlichen Leitplanken vermissen lässt. In den Vorträgen wurden einige Beispiele für eigeninitiierte Produktionen klimaneutralen Kraftstoffs aufgezeigt. Neste betreibt HVO-Produktionsanlagen mit nicht unerheblichen Kapazitäten und Tankstellen in Nordeuropa. Porsche nimmt zeitnah eine Anlage in Südamerika in Betrieb, in der zwar relativ geringe Mengen Methanol aus Windenergie, Elektrolyse und Luft-CO₂ hergestellt werden; eine weitere Skalierung ist aber bereits in Planung. Shell transformiert den Energy and Chemicals Park Rheinland hin zu einer Produktionsanlage für nachhaltige Kraftstoffe und Ersatzprodukte für die chemische Industrie. Und Volkswagen verstärkt seine Anstrengungen, R33 Diesel und Blue Gasoline verstärkt auf den Markt zu bringen. Die erzielten CO₂-Reduzierungen werden im Moment jedoch nur unzureichend honoriert oder gefördert, obwohl sich Universitäten, Verbände und Forschungseinrichtungen in einem Punkt einig sind: Selbst wenn die Elektromobilität mit vollem Erfolg durchgesetzt wird und die Verjüngung der Pkw-Gesamtflotte den enormen Erwartungen entspricht, werden die Klimaziele dennoch deutlich verfehlt – eine Lücke, die nur über die Bestandsflotte geschlossen werden kann. Mehrere Forschungsarbeiten befassen sich genau mit dieser Lücke, die mit einer Beimischung von insgesamt 40 % regenerativen Kraftstoffen zu herkömmlichen fossilen Energieträgern geschlossen werden könnte. Um die Flotte zu erreichen, müssen diese Mischkraftstoffe den aktuellen Normen EN 590 für Diesel und EN 228 für Ottokraftstoff entsprechen. Für synthetische Dieselmischkraftstoffe wie HVO muss die Norm EN 15940 anerkannt werden. Nach Ansicht des KIT und anderer sind dies lösliche Aufgaben. Für die Zulassung bedarf es dann eigentlich nur noch des politischen Willens.

Conference Report

Voices from the International Engine Congress 2022

The 9th International Engine Congress took place on February 22 and 23 as a hybrid event which offered the option of attending online or in person in Baden-Baden. Experts from industrial companies, research institutions and industry associations discussed the key issues relating to the role of the internal combustion engine in a climate-neutral future.

GUTZMER _ It was really good to be able to meet face-to-face again and also worth-while, since the opportunity to join in what are sometimes controversial discussions with colleagues alongside the presentations is part and parcel of an event like this. It is true that we can work online, but the way that ideas are shared has a very anonymous feel.

We had some very open debates at this congress about the key themes of climate action and the transport transition. It became evident that the transport transition is not the same thing as electric mobility, but as energy transition, as it is a move away from the use of fossil fuels. We need to make this fact much clearer to the public, politicians and the leaders of industry. Yes, we have to defossilize. This means we must stop using fossil fuels as quickly as possible, despite the fact that they are what has brought us our prosperity and freedom of movement and that without them many sectors of industry and our current forms of transport would not have been possible at all. Based on renewable energy generation, electrification is clearly a path that no one questions. However, the direct use of electricity from batteries in individual vehicles is not the only way for us to proceed and not the right solution for everyone. The progress we are making with replacing existing vehicles and developing the infrastructure that we will need is much too slow. Relying only on this is obviously not sufficient to bring about a significant drop in CO₂ emissions, meet the temperature targets and take effective action to protect the climate on the basis of the goals laid down in law. One single solution is not enough, in just the same way as the focus on the tank-to-wheel evaluation is inadequate. Especially in the political assessment, too little attention is being paid to the comprehensive holistic approach to the residual budget of the still permissible global CO₂ emission to the 1.5 degree target. We have acknowledged that, in the light of all of this, it is much more important to make the huge number of existing vehicles part of the solution by running them on electricity- and

biomass-based fuels, and not reserving these fuels only for aviation and shipping. Germany cannot become energy-independent and even Europe will have difficulty in doing so. We will still need to import energy and we will require a variety of other defossilized fuels in liquid or gas form along side hydrogen for a wide range of applications. The most useful energy converter in this respect is not an electric motor but an internal combustion engine.

I would like to emphasize once again that we are not calling electric vehicles into question, but they will not be enough, even with increases in efficiency, to meet the climate targets in Germany and in Europe as a whole at the pace that is urgently needed while also covering the full range of different applications and gaining widespread customer acceptance. In addition, we will not survive in the competitive global market if we put all our eggs in one basket, even if some believe this from their simplistic perspective. Innovative solutions do not come out of bans or one-sided subsidies, but out of technological competition within a corresponding legislative framework. We need pioneers to take action as Porsche and also Bosch, VW, Shell and Neste have done.

BEIDL _ A diverse range of powertrains is more urgently needed in the commercial vehicle market than anywhere else. Hydrogen, e-fuels and biofuels, synthetic methane, ammonia and, of course, electricity are essential for the many different purposes that these vehicles are used for. As a rule of thumb, the shorter and more predictable the journey, the more likely it is that pure electric vehicles will be suitable. On long-haul routes, the increased cost and weight of an electric powertrain with batteries and the resulting rise in the TCO will make the use of electric vehicles difficult. And we have not even mentioned the development of a separate charging infrastructure with super-fast chargers. In aviation and shipping, technology paths other than electrification are being pursued, at least in the medium term. The same goes for the off-highway industry where the energy supply is often brought to the vehicle rather than the other way around. Here manufacturers and operators are skeptical about whether full electrification could ever be successful, despite the huge commitment and the broad range of imaginative ideas. Deutz, for example, is developing its own large batteries and, depending on the locations where the machines are used, is also relying on converting hydrogen back into electricity to supply construction machinery with energy. The machinery manufacturer Liebherr is attempting to tailor the applications and the powertrains to the customer which involves the not insignificant risk of having to provide all the possible energy conversion concepts simultaneously and in small numbers. It is clearly evident that future engine development will be very much shaped by the area of tension between emission regulations and usage requirements. One example is the intensively discussed hydrogen engine, which will be an essential component for implementing the hydrogen strategy in the commercial vehicle sector. Remarkable progress was presented here.

DUMS _ We cannot wait – this was the industry’s credo in the Fuels section of the congress. That is why a number of companies are creating facts, even though the legislation still lacks the much-needed reliable guidelines. The presentations included some examples of self-initiated productions of climate-neutral

fuel. Neste has set up its own HVO production facilities with a significant capacity, together with fuel stations in northern Europe. Porsche will soon be opening a plant in South America that will produce admittedly relatively small volumes of methanol from wind energy, electrolysis and atmospheric CO₂, but there are already plans to scale up the facility. Shell is transforming the Energy and Chemicals Park Rheinland into a production plant for sustainable fuels and substitutes for the chemical industry. And Volkswagen is increasing its efforts to bring R33 diesel and Blue Gasoline onto the market in larger quantities. The CO₂ reductions achieved, however, are currently only insufficiently recognized or funded, despite the fact that universities, industry associations and research institutions agree on one thing: Even if electric vehicles are a complete success and the regeneration and all the new cars fulfill the enormous expectations, we will still fail to meet our climate targets by a long way, which is a gap that can only be closed by the existing fleet. Several research studies are looking at precisely this gap, which could be closed by adding 40 % renewable fuels to the conventional fossil energy sources. These mixed fuels would have to comply with the existing standards for diesel (EN 590) and gasoline (EN 228) in order to be used in current vehicles. For synthetic diesel fuels such as HVO, the EN 15940 standard must be recognized. According to the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) and other organizations, this is a problem that can be solved. Then all that will be needed for the approval process is the political will.

Inhaltsverzeichnis

Reduction of catalyst purge air mass flow at overrun fuel cut-off as an alternative to torque neutral combustions

Thomas Pausch

Turbo Compressor for Efficient High-Pressure Air Supply in Catalyst Heaters

Jens Löffler, Mario Staiger, Benjamin Dietz, Ahmet Çokşen, Sönke Teichel und Philipp Handschuh

Why internal combustion engines and fuel cells will both play a role in a future hydrogen society

Thomas Lüdiger

Experimental investigation of a hydrogen powered heavy-duty truck engine

Daniel Rieger, Florian Mayer, Fabian Weller, Simon Schneider und Roman Stiehl

Multi-dimensional knock control for lean operating HICEs

Daniel Thomas Koch, Benedikt Judt und Alvaro Sousa

FVV Fuels Study IV – Transformation of European Mobility to the GHG Neutral Post-Fossil Age

Ulrich Kramer, David Bothe und Frank Dünnebeil

Fulfilling fuel specifications and resulting challenges of refuels

Thomas Weyhing, Mitra Zabihigivi, Olaf Toedter, Uwe Wagner und Thomas Koch

Synthetic Fuel Detection for Vehicles in Field using Machine Learning

André Bojahr, Hilko Janßen und Nils Paetsch

Passive Pre-Chamber Spark Plug Development, Optical Analysis and Mass Production Feasibility

Marko Certic, Peter Janas, Paul Kapus, Harald Philipp, Ernst Winklhofer, Daniel Hilbert, James Lykowski und Matthias Neubauer

Comparison of DOC-based vs. NO_x storage-based aftertreatment architectures as related to pollutants conversion efficiency and GHG impact

Chiara Pozzi, Giuseppe Previtero, Luisa Cusanno und Rahul Mital

Investigations on the Impact of Urea-Dosing on Particulate Number Measurement for Heavy-Duty Applications

Patrick Noone, Nicolas Hummel, Marcel Lehrian, Christian Beidl, Neil Kunder, Hannes Noll, Werner Hirtler, Cosimo Fiorini, Christos Dardiotis, Ansgar Wille, Kazuya Mori, Henry Jahnke, Claus Dieter Vogt, Andreas Geißelmann und Christian Tomanik

Integration of Neural Networks in GT-Suite and Coupling with an RL-Agent for Automation of Control and Regulation Tasks for a commercial H₂ engine

Sebastian Bodza, Dominik Rether, Michael Grill, Michael Bargende und Arijeet Chakrabarty

Drop-In Renewable Gasoline Fuels for CO₂ Reduction: Evaluation and Demonstration of Functional Potentials

Hanno Krämer, Markus Send, Maik Gessner, Michael Storch, Torsten Kunz und Jan Niklas Geiler

Impact of OME-Diesel blends to a state of the art exhaust gas aftertreatment system and resulting tailpipe emissions of a multi cylinder and a single cylinder research engine

Alexander Mokros, Philipp Demel, Friedemar Knost und Christian Beidl

Renewable fuels from biomass and their contribution for a sustainable mobility

Franziska Müller-Langer, Jörg Schröder und Karin Naumann

Analysis of Mixture Formation and Combustion in H₂ Engines for Passenger Cars and Light Commercial Vehicles

David Lejsek, Philippe Leick, Paul Jochmann, Peter Grabner und Eberhard Schutting

Exhaust gas aftertreatment system layout for hydrogen internal combustion engines

Lukas Virnich, Thomas Durand, Verena Huth und Matthias Thewes

Application of Dynamic Skip Fire for NO_x and CO₂ Emissions Reduction on a HD Diesel Truck and for an Off Highway Engine

Robert Wang, Hao Chen, Vijay Srinivasan, Hans-Josef Schiffgens, Bouzid Seba und Nicolas Jansen

Variable Compression Ratio System for Next Generation Large Bore Engines - Latest Development Results

Christopher Marten, Stefano Ghetti, Werner Bick und Uwe Schaffrath

Sustainable heavy-duty transport from an energy-system perspective

Karsten Wilbrand, Jörg Adolf, Andreas Janssen und Andreas Kolbeck

Closed Carbon Cycle Mobility – Evaluation of Synthetic Fuels Based on Methanol from Renewable Sources

Benedikt Heuser, Johanna Otting, Thorsten Schnorbus und Martin Mütter

Mobility of the Future – Mood Among Mobile Citizens

Thomas Hametner, Andrej Prosenc und Jürgen Blassneger

Renewable and eFuels take us closer to the climate goals

M. Hultman und T. Sarjoavaara

xHEV-concept for achieving the 2030 CO₂ emission targets

Matthias Thewes, Tolga Uhlmann, Christian Sahr, Norbert Alt, Dominik Lückmann, Andreas Balazs, Tobias Vossball, Matthias Uebbing, Christian Kürten, Peter Zwar und Andreas Müller

Thermal management of e-drivetrains through new cooling fluids

Volker Null

Spark Ignition - Searching for the Optimal Spark Profile

Jakob Ångeby, A. Saha, O. Björnsson und M. Lundgren

Direct Air Capture (DAC): Challenges and Opportunities to Meet Climate Targets

Hans Kistenmacher, Ron Chance und Peter Eisenberger

Measures to increase the CO₂ reduction potential of renewable fuels in the period up to 2030

Thomas Garbe und Bjoern Noack

The off-highway sector in the field of tension of future power train concepts - Which chances has the internal combustion engine (ICE) in this industry?

Ulrich Weiss

Renewable Engine Oils Test

Rick Lee

Autorenverzeichnis

Jörg Adolf Shell Global Solutions (Deutschland) GmbH, Hamburg, Deutschland

Norbert Alt FEV Group GmbH, Aachen, Deutschland

Jakob Ängeby SEM AB, Åmål, Schweden

Andreas Balazs FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Michael Bargende Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Christian Beidl Institute for Internal Combustion Engines and Powertrain Systems (VKM), Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

Werner Bick FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

O. Björnsson Department of Energy Sciences, Lund University, Lund, Schweden

Jürgen Blassnegger Technisches Büro DI Dr. Blassnegger, Wolfsberg, Österreich

Sebastian Bodza Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

André Bojahr IAV GmbH, Berlin, Deutschland

David Bothe Frontier Economics Ltd., Köln, Deutschland

Marko Certic AVL List GmbH, Graz, Österreich

Arijeet Chakrabarty Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Stuttgart, Deutschland

Ron Chance Global Thermostat, Brighton, CO, USA

Hao Chen Tula Technology Inc., San Jose, CA, USA

Ahmet Çokşen ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Mulfingen, Deutschland

Luisa Cusanno Punch Torino SpA, Turin, Italien

Christos Dardiotis AVL List GmbH, Graz, Österreich

Philipp Demel Institute for Internal Combustion Engines and Powertrain Systems (VKM), Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

Benjamin Dietz ebm-papst St. Georgen GmbH & Co. KG, St. Georgen, Deutschland

Frank Dünnebeil ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, Deutschland

Thomas Durand FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Peter Eisenberger Global Thermostat, Brighton, CO, USA

Cosimo Fiorini AVL List GmbH, Graz, Österreich

Thomas Garbe Volkswagen AG, Wolfsburg, Deutschland

Jan Niklas Geiler Powertrain Solutions, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Deutschland

Andreas Geißelmann Umicore AG & Co. KG, Hanau, Deutschland

Maik Gessner Audi AG, Ingolstadt, Deutschland

Stefano Ghetti FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Peter Grabner Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics (IVT), Technische Universität Graz, Graz, Österreich

Michael Grill Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Stuttgart, Deutschland

Thomas Hametner ÖAMTC, Wien, Österreich

Philipp Handschuh ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Mulfingen, Deutschland

Benedikt Heuser FEV Group GmbH, Aachen, Deutschland

Daniel Hilbert AVL List GmbH, Graz, Österreich

Werner Hirtler AVL List GmbH, Graz, Österreich

M. Hultman Nestle Corporation, Stockholm, Schweden

Nicolas Hummel Institute for Internal Combustion Engines and Powertrain Systems (VKM), Technische Universität Darmstadt, Karlsruhe, Deutschland

Verena Huth FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Henry Jahnke NGK Europe GmbH, Kronberg, Deutschland

Peter Janas Federal-Mogul Ignition GmbH, Burscheid, Deutschland

Nicolas Jansen Liebherr Machines Bulle SA, Bulle, Schweiz

Hilko Janßen IAV GmbH, Berlin, Deutschland

Andreas Janssen Shell Global Solutions (Deutschland) GmbH, Hamburg, Deutschland

Paul Jochmann Powertrains Solutions, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Deutschland

Benedikt Judt KEYOU GmbH, München, Deutschland

Paul Kapus AVL List GmbH, Graz, Österreich

Hans Kistenmacher Global Thermostat, Brighton, CO, USA

Friedemar Knost Institute for Internal Combustion Engines and Powertrain Systems (VKM), Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

Daniel Thomas Koch KEYOU GmbH, München, Deutschland

Thomas Koch Institute of Internal Combustion Engines, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Deutschland

Andreas Kolbeck Shell Global Solutions (Deutschland) GmbH, Hamburg, Deutschland

Ulrich Kramer Ford-Werke GmbH, Köln, Deutschland

Hanno Krämer Audi AG, Ingolstadt, Deutschland

Neil Kunder AVL List GmbH, Graz, Österreich

Torsten Kunz Powertrain Solutions, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Deutschland

Christian Kürten FEV Vehicle GmbH, Aachen, Deutschland

Rick Lee Evolve Lubricants Inc., Reno, NV, USA

Marcel Lehrian Institute for Internal Combustion Engines and Powertrain Systems (VKM), Technische Universität Darmstadt, Karlsruhe, Deutschland

Philippe Leick Powertrains Solutions, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Deutschland

David Lejsek Powertrain Solutions, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Deutschland

Jens Löffler ebm-papst St. Georgen GmbH & Co. KG, St. Georgen, Deutschland

Dominik Lückmann FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Thomas Lüdiger FEV Consulting GmbH, Aachen, Deutschland

M. Lundgren Department of Energy Sciences, Lund University, Lund, Schweden

James Lykowski Federal-Mogul Ignition GmbH, Burscheid, Deutschland

Christopher Marten FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Florian Mayer MAHLE International GmbH, Stuttgart, Deutschland

Rahul Mital GM Global Technical Center, Warren, MI, USA

Alexander Mokros Institute for Internal Combustion Engines and Powertrain Systems (VKM), Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

Kazuya Mori NGK Europe GmbH, Kronberg, Deutschland

Andreas Müller FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Franziska Müller-Lange Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), Leipzig, Deutschland

Martin Müther FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Karin Naumann Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), Leipzig, Deutschland

Matthias Neubauer AVL LIST GmbH, Graz, Österreich

Bjoern Noack Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen, Deutschland

Hannes Noll AVL List GmbH, Graz, Österreich

Patrick Noone Institute for Internal Combustion Engines and Powertrain Systems (VKM), Technische Universität Darmstadt, Karlsruhe, Deutschland

Volker Null Shell Global Solutions (Deutschland) GmbH, Hamburg, Deutschland

Johanna Otting FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Nils Paetsch IAV GmbH, Berlin, Deutschland

Thomas Pausch Mercedes Benz AG, Stuttgart, Deutschland

Harald Philipp AVL List GmbH, Graz, Österreich

Chiara Pozzi Punch Torino SpA, Turin, Italien

Giuseppe Previtero Punch Torino SpA, Turin, Italien

Andrej Prosenec ÖAMTC, Wien, Österreich

Dominik Rether Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Stuttgart, Deutschland

Daniel Rieger MAHLE International GmbH, Stuttgart, Deutschland

A. Saha Department of Energy Sciences, Lund University, Lund, Schweden

Christian Sahr FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

T. Sarjovaara Technology Centre, Nestle Corporation, Porvoo, Finnland

Uwe Schaffrath FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Hans-Josef Schiffgens Tula Technology Inc., San Jose, CA, USA

Simon Schneider MAHLE International GmbH, Stuttgart, Deutschland

Thorsten Schnorbus FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Jörg Schröder Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), Leipzig, Deutschland

Eberhard Schutting Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics (IVT), Technische Universität Graz, Graz, Österreich

Bouzid Seba Liebherr Machines Bulle SA, Bulle, Schweiz

Markus Send Audi AG, Ingolstadt, Deutschland

Alvaro Sousa KEYOU GmbH, München, Deutschland

Vijay Srinivasan Tula Technology Inc., San Jose, CA, USA

Mario Staiger ebm-papst St. Georgen GmbH & Co. KG, St. Georgen, Deutschland

Roman Stiehl MAHLE International GmbH, Stuttgart, Deutschland

Michael Storch Powertrain Solutions, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Deutschland

Matthias Thewes FEV Group GmbH, Aachen, Deutschland

Olaf Toedter Institute of Internal Combustion Engines, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Deutschland

Christian Tomanik Umicore AG & Co. KG, Hanau, Deutschland

Sönke Teichel ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Mulfingen, Deutschland

Matthias Uebbing FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Tolga Uhlmann FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Dieter van der Put FEV Group GmbH, Aachen, Deutschland

Lukas Virnich FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Claus Dieter Vogt NGK Europe GmbH, Kronberg, Deutschland

Tobias Vosshall FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

Uwe Wagner Institute of Internal Combustion Engines, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Deutschland

Ulrich Weiss Liebherr Machines Bulle SA, Bulle, Schweiz

Fabian Weller MAHLE International GmbH, Stuttgart, Deutschland

Thomas Weyhing Institute of Internal Combustion Engines, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Deutschland

Karsten Wilbrand Shell Global Solutions (Deutschland) GmbH, Hamburg, Deutschland

Ansgar Wille NGK Europe GmbH, Kronberg, Deutschland

Ernst Winklhofer AVL List GmbH, Graz, Österreich

Mitra Zabihigivi Institute of Internal Combustion Engines, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Deutschland

Peter Zwar FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland



Reduction of catalyst purge air mass flow at overrun fuel cut-off as an alternative to torque neutral combustions

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Pausch, M.Sc. ^{1 2}

¹ Mercedes-Benz AG, Stuttgart, Germany

² Institut für Land- und Seeverkehr (ILS), TU Berlin, Germany

Abstract. The following paper introduces a new approach of reducing the purge air slip during overrun phases with fuel cut off to keep the three-way-catalyst near its operating range for the following tip-in, as an alternative to late combustions at zero load with high specific fuel consumption. Therefore there are investigations at a gasoline engine with electromechanical camshaft phase actuation in a wide range presented, that show a significant reduction of the air mass flow at overrun without engine stopping. Using the camshaft actuation the flow and the oxygen concentration over time in the exhaust system are controlled via the measured throttle pressure ratio and the exhaust oxygen sensors. To achieve a noticeable and reproducible reduction in nitrous oxide and carbon monoxide tailpipe emission concentrations at tip-in, the flow has to be reduced quickly towards zero to keep the oxygen concentration low in the exhaust aftertreatment system, while the hydrocarbon tailpipe emission concentration remains at the reference level. The presented observations are pointing out key points for a derived cascaded controller structure.

The presented investigation is part of the author's doctoral thesis program at Mercedes-Benz AG in cooperation with the ILS at TU Berlin.

Keywords: Purge air reduction, Three-Way-Catalyst purge, electromechanical camshaft phasing, tailpipe pollutant emissions.

1 Motivation

Steadily emerging emission legislations in regulated markets all over the world are forcing the tailpipe emission species limit further towards near zero thresholds, which leads to the need of technologies that quickly set up and keep the exhaust gas aftertreatment in a high conversion rate under nearly all operating conditions [1]. Beneath the cold start emission behavior the emission performance in warm conditions after catalyst light-off become more important with rising balanced distance and when the limitation is not rising with distance, too. In this case, in dependence of the cold start performance respecting the gap to the total limit, the fuel cut-off at overrun comes in focus. Shown

in Figure 1, there are tailpipe emission shares for nitrous oxide and carbon monoxide, catalyst temperature, engine break power, injection activation state and driven distance displayed over time for an exemplary real driving trip. For the distance of 8km, as intended for balancing at EURO 7 legislation draft discussions [1], it can be seen that still over 25% of nitrous oxide emissions and over 50% of carbon monoxide emissions remain from the driving phase after catalyst heating, that is 880 of 900 s or 7,95 of 8 km.

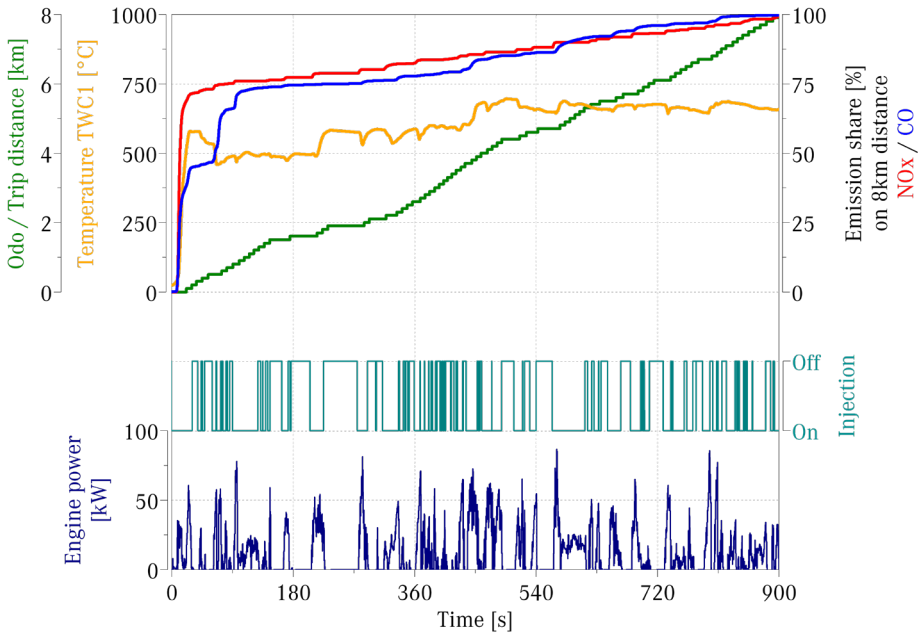


Fig. 1. Emission share, catalyst temperature and trip distance of a real driving trip over time for a midsize passenger car with EU6d application and fuel cut-off at overrun

The scavenging of the Three-Way-Catalyst (TWC) with air during overrun with deactivated injection causes this behavior. When the fuel injection is cut off due to no torque request the engine is pumping air through the exhaust system with TWC. Depending on duration and engine speed there is a high amount of oxygen in the exhaust system and on top in the whole Cer-based oxygen storage of state-of-the-art TWCs, when the combustion mode repossesses with the recurring torque request at driver's tip-in. The burned gas purges progressively the unburned air out of the exhaust system and the oxygen storage, leading to a reconstitution of stoichiometric conditions with lean-rich-amplitude [6]. To raise the reliability and speed of this operation, the combustion air-fuel-ratio is enriched leading to an oxygen shortage.

Anyhow, even with rich combustion mode and its specifically lower nitrous oxide emissions compared to stoichiometric mode, nitrous oxide is not converted properly because of the lack of carbon monoxide as reductant. Carbon monoxide and hydrocarbon is preliminarily oxidized due to the high oxygen concentration. The second oxygen

sensor behind the TWC in conjunction with oxygen storage models in the engine control unit (ECU) controls the termination of the catalyst purging and the enrichment. In cause of the retention between the combustion chambers and the aftertreatment system with its sensors, this phase becomes usually slightly longer than needed. As a short-term result there is an excessive rich fuel passing the TWC with its already purged oxygen storage and leads to following carbon monoxide tailpipe emissions, too. The explained progression is shown below in Figure 2.

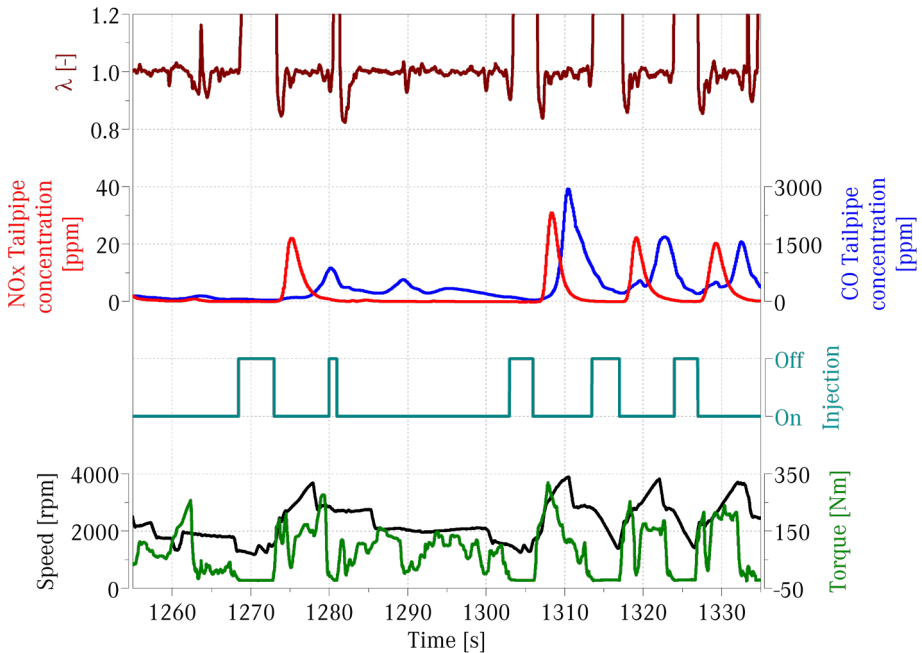


Fig. 2. Tailpipe emission concentration and measured combustion-air ratio at wideband oxygen sensor position in real driving with overrun mode and fuel cut off

As a state-of-the-art prevention the fuel cut-off can be prohibited and torque neutral combustions with late ignition angles at minimum cylinder load can be held up for keeping the TWC in its conversion area. Aside from the disadvantageous combustion conditions with poor efficiency, it has to be neglected in the interest of fleet carbon dioxide emissions, the fuel consumption represented in the total cost of ownership and not at least the sustainability itself. With the ambition to research a solution of avoidance, there were pre-development investigations in line with a doctoral research study set up to prospect for an highly reduction of engine or respectively catalyst purge air using advanced engine technologies which also have further advantages for their costs.

2 Technology set

Setting up on a state-of-the-art gasoline four cylinder engine with EU6d-application and homogenous combustion operation, the hydraulic camshaft phasers on intake and exhaust side were changed to electromechanical ones with increased actuation range. The presented investigation was realized at a stationary engine test bed with air flow and exhaust gas species concentration measurement.

Table 1. Technical data of test engine

Number of cylinders [-]	4
Displacement [cm ³]	1992
Combustion type	homogeneous, direct-injected, turbo charged
Injection pressure [MPa]	35
Exhaust aftertreatment	EU6d (2x TWC & cGPF); aged (ZDAKW)
Intake cam width [°CA]	160
Exhaust cam width [°CA]	190
Phasing range intake cam [°CA]	120
Phasing range outlet cam [°CA]	120

3 Variation of purge air mass flow via wide valve timing shift

A massively reduction of the air mass flow into the exhaust system, while the pistons are still oscillating, is possible by throttling the intake process totally or by an appropriate valve operation or timing. Closing the throttle actuator for reducing the manifold pressure and therewith the cylinder filling is limited by the gaining pressure difference between crankcase and combustion chamber. If the difference is too high it leads to a flow of oil particles into the combustion chamber resulting in specifically raising particle emissions finally at tip-in [5]. Due to this restriction to a given charge density, the air mass flow also rises with engine speed. On the other side valve variability offers more advantages especially with the possibility of zero-lifting, means cylinder de-activation, or valve opening and closing at same cylinder volumes to tear down gas exchange. Figure 3, page 5, shows on the left the variation of throttle state over speed for a constant Intake Spread Angle (ISA) of 125 °CA after Top Dead Center (TDC) and an Exhaust Spread Angle (ESA) of 120 °CA before TDC. It shows, that throttling allows a wide variation of air mass flow, especially at rising speed, but does not provide a lowering to zero, even at ignoring the maximum cylinder-crankcase pressure difference at closing the throttle fully. On the right in Figure 3, page 5, the cross variation of intake and exhaust cam or respectively valve timing at a constant crankshaft speed of 2000 rpm and fully opened throttle shows with 7 kg/h a lower minimal value than throttling at same speed. To achieve this cam timing (ISA of 180°CA after TDC and ESA 190°CA before TDC) there is a wide phase shift needed, which only electromechanical cam phasers with gearboxes or valve lift profile switching can realize [3]. The difference to combustion valve timings at full valve overlap is in maximum greater than 100 °CA.

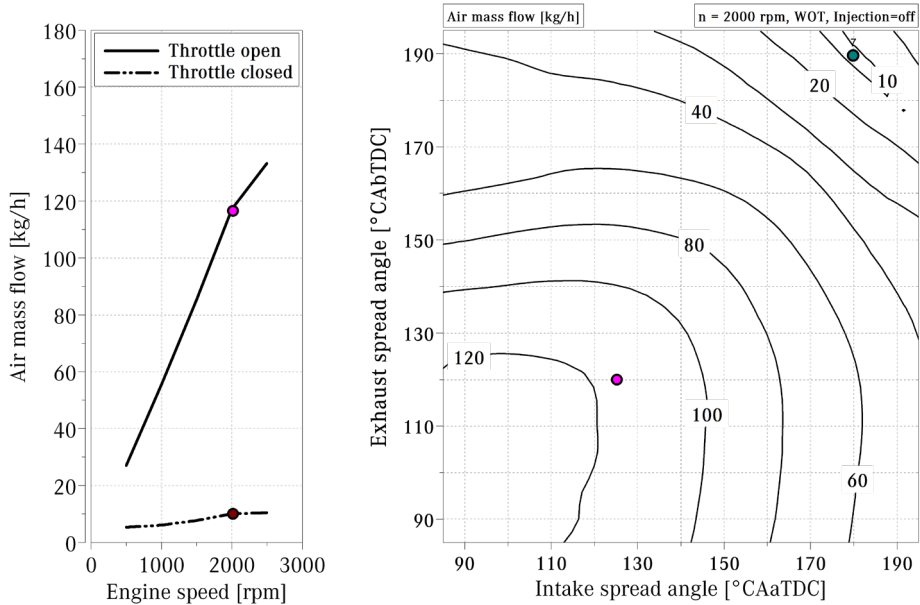


Fig. 3. Air mass flow over speed with constant valve timing and variation of throttle state (left) / Air mass flow over intake and exhaust cam timing at constant speed and open throttle (right)

However, a full reduction of the engines air mass flow down to zero, as possible with full engine cylinder de-activation, is not achievable with only one of this variation regimes (throttle, intake phasing, exhaust phasing). Nevertheless, in combination the reduction potential gets higher, as typified in chapter 4 of this paper.

To accommodate the effect of the purge air flow reduction by shifting valve timing to equivalent valve opening and closing volumes, there is Figure 4 at page 6. In comparison to the graphs of throttling (dark-red) and non-throttling (magenta), both at the same valve timing of $ISA = 125^\circ CAaTDC$ and $ESA = 120^\circ CAbTDC$, the teal graph displays a cylinder pressure curve with compression before and an expansion after every TDC, that is nearly full symmetrical to every TDC. This progression is caused by an earlier shifting of exhaust camshaft timing about $70^\circ CA$ and an later shifting of intake camshaft timing about $55^\circ CA$, as shown in Figure 4 (left), where the maximum valve lift elevation is near the bottom dead center (BDC). The graphs belong to the air mass flow measuring points from Figure 3, marked with the same colored bubbles.

Comparing the three progressions it is obvious, that with equivalent valve opening and closing cylinder volumes the gas exchange loop, and thereby the drag torque demand, gets smallest (see Figure 6, page 8). The pistons compress gas from almost the same cylinder volume to where it is expanded afterwards. Throttling of the engine is not possible anymore leading to rising cylinder peak pressure. As a result, the pressure levels in manifold and exhaust align with each other increasingly. Nevertheless, the closing of throttle is expedient in the matter of noises, too. The gas still gets waved by the oscillating pistons and valves are still acting. Regarding the vibration behavior an

unacceptable degradation cannot be stated so far, while the stimulation should be doubled in its frequency.

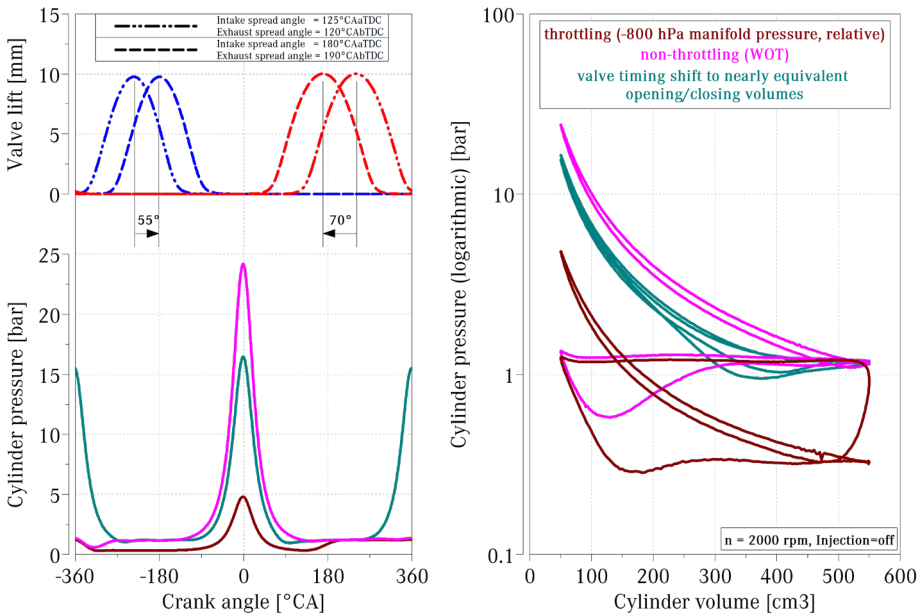


Fig. 4. Intake valve lift, exhaust valve lift and cylinder pressure over crank angle (left) and over cylinder volume (right) for throttling (dark-red), non-throttling (magenta) and wide valve timing shift (green) to nearly equivalent opening/closing cylinder volumes at overrun phase

Every reduction of engine air mass flow towards zero induces upcoming issues for the crankcase ventilation system. Caused by the unstoppable blow-by mass flow across the piston ring gap into the crankcase, the crankcase pressure rises towards or above the atmosphere. Emission from crankcase into the atmosphere is forbidden, so the need to close ventilation pipes by check valves arises, when the pressure difference is set to zero or positive pressure conditions in comparison to the venting at combustion mode.

As already indicated, the loss of cylinder mass due to blow-by is directly compensated by in-cylinder flow from intake or exhaust side. To prevent a possible back breathing from exhaust side the use of ECU sensors like oxygen sensor before and behind TWC is consequent. In conjunction with the throttle body pressure sensors the control of an balancing only from intake side is pursued, as further typified in chapter 5.

In the end, any control strategy does not lower the crankcase pressure back to conventional levels and is primarily optimizing TWC control for lower tailpipe emissions as stated in the following chapter. Consequent solutions for an appropriate crankcase ventilation, with sufficient oil deposition rate and no oil leakage or any type of evaporation into the atmosphere, are not part of this paper and its investigations.

4 Instationary investigation at Tip-Out / Tip-In event

Accommodating the question how much purge air mass flow reduction is needed to achieve lower tailpipe pollutant emissions, a overrun phase with the duration of 10 s as interrupt at a working point at 2000 rpm and 10 Nm of engine break torque was selected. At this representative test case several actuator strategies were compared over time, always referencing to throttling at the minimal allowed manifold pressure. The compared strategies of wide valve timing shift for air mass flow reduction, as introduced in chapter 3, were varied in several steps of throttle pressure ratio (TPR) as a measure of in-cylinder air mass flow and adjusted by an appropriate intake camshaft phase timing.

$$\text{Throttle pressure ratio} = \frac{\text{intake manifold pressure}}{\text{pressure before throttle}} \quad (1)$$

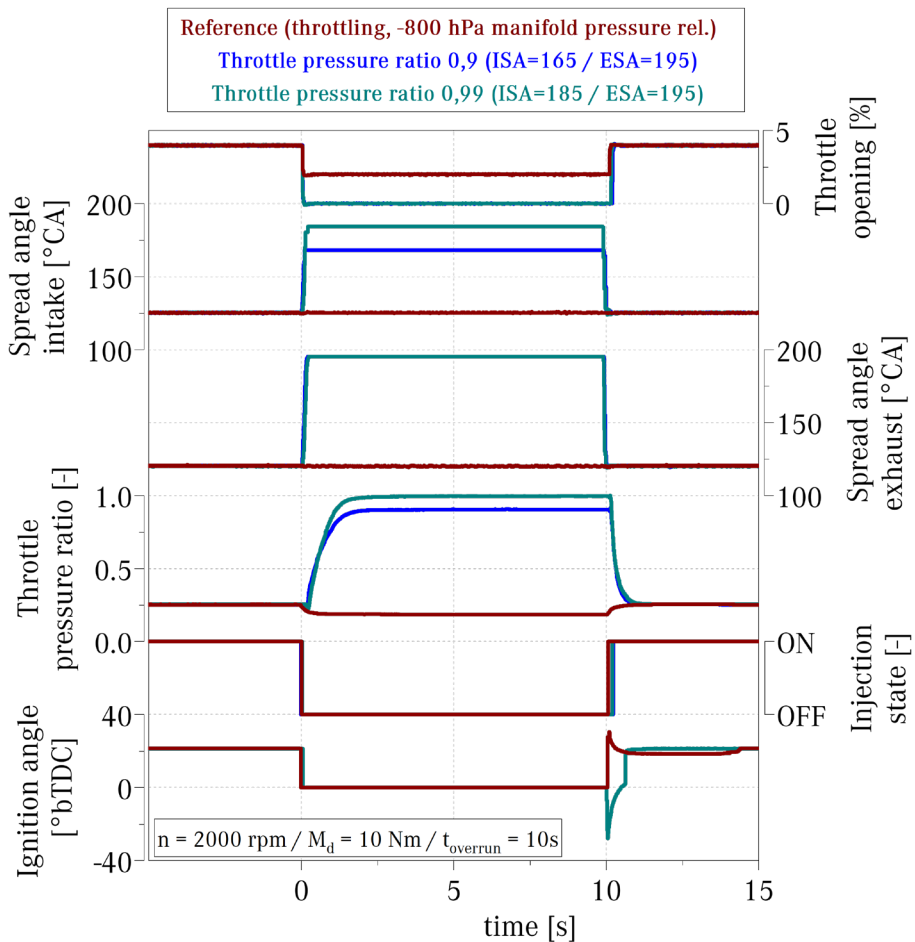


Fig. 5. Comparison of actuation strategies throttling and mass flow control via valve timing shifting at a 10s overrun event by means of several engine actuator and sensor states

In Figure 5, page 7, the states of several engine actuators are shown. The fuel injection is cut off during overrun and the throttle is controlling the manifold pressure or, in case of the widely valve shifting for flow reduction, completely closing. To reach the area of very low purge air mass flow, the camshaft phase is shifted widely, as already stated with Figure 3. The throttle pressure ratio, as quantization of in-cylinder flow coming over the throttle at a given opening angle, is measured and calculated by the ECU with its sensors up- and downstream of the throttle body. The TPR gets varied in two different steps via an appropriate intake camshaft phase or respectively valve timing. A difference at the progression of the ignition angle is also exposed at tip-in, which is caused by the unavoidable de-throttling, as already mentioned. To meet the demanded torque, there has to be an appropriate ignition angle intervention, amongst others.

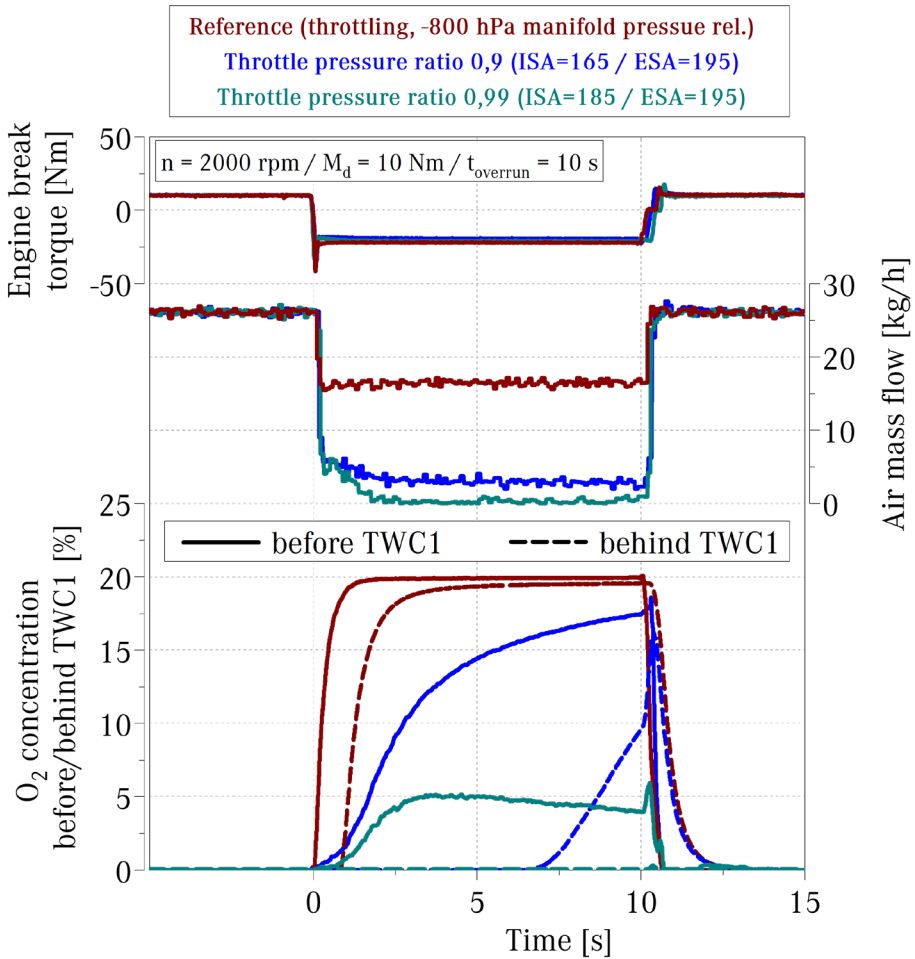


Fig. 6. Test bed measurement of break torque, air mass flow and TWC located oxygen concentrations for the comparison of actuation strategies throttling and mass flow control via valve timing shifting at 10s overrun event