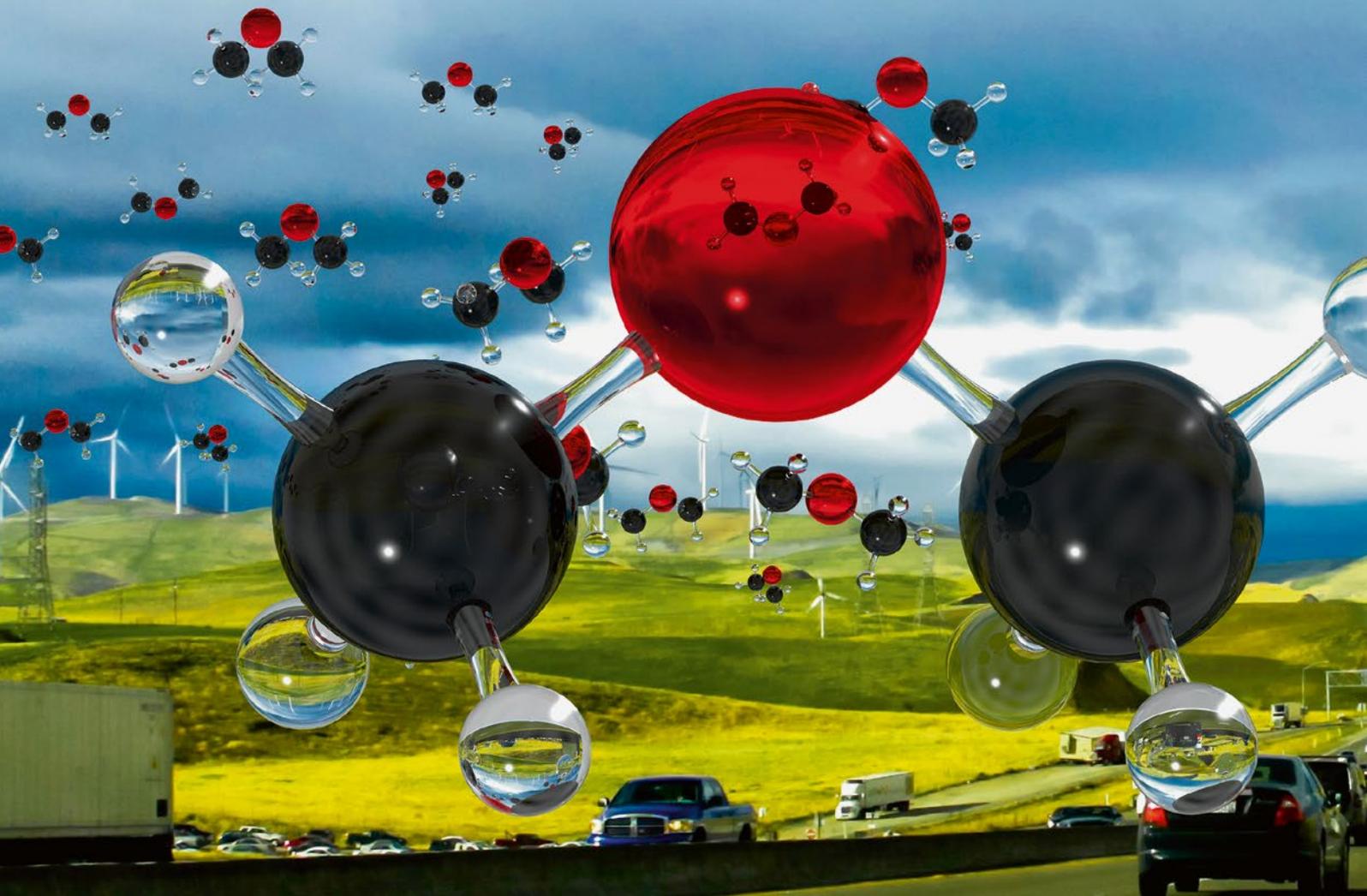


Sauerstoffhaltige Kraftstoffe im selbstzündenden Verbrennungsmotor

Die Erfüllung zukünftiger Ziele zur Treibhausgasminimierung bei gleichzeitiger Schadstoffminimierung lässt sich auch mithilfe des Verbrennungsmotors bewältigen, wenn man den Kraftstoff als freien Parameter in die Optimierung des Antriebsstrangs einbezieht. In einem vom BMWi geförderten Konsortium wurden deshalb sauerstoffhaltige kurzkettige Kraftstoffe für den Einsatz im Selbstzünder untersucht, um deren Verbrennungs- und Schadstoffbildungseigenschaften motorisch und am Fahrzeug zu studieren.

© Ford



AUTOREN



Dr.-Ing. Werner Willems
ist Technischer Spezialist
Sustainable Fuels Research im
Ford Research and Innovation
Center in Aachen.



Dipl.-Ing. Marcel Pannwitz
ist Entwicklungsingenieur im Fach-
bereich Vorentwicklung Antriebs-
strang bei der IAV GmbH in Berlin.



Marius Zubel, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher
Mitarbeiter am Lehrstuhl für
Verbrennungskraftmaschinen
der RWTH Aachen University.



Dr.-Ing. Jost Weber
ist Abteilungsleiter Diesel
System bei der Denso Automotive
Deutschland GmbH im Aachen
Engineering Center in Wegberg.

MOTIVATION

Um die globale Erwärmung zu begrenzen, ist die Reduzierung und Vermeidung von Treibhausgasen (THG) zu einem der wichtigsten Technologietreiber für industrielle Anwendungen weltweit geworden. Dabei gehört der Verkehrssektor, der mit seinen von Pkw und Nutzfahrzeugen verursachten CO₂-Emission im Mittelpunkt politischer und gesellschaftlicher Diskussionen steht, zu den größten Treibhausgasemittenten. Somit müssen zusätzliche Anstrengungen unternommen

werden, um die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu reduzieren und damit die globale Erwärmung zu begrenzen. Neben disruptiven Konzepten wie rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen sind auch evolutionäre Ansätze vielversprechend, die auf Verbrennungsmotoren mit synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen basieren.

ANFORDERUNGEN AN NACHHALTIGE SYNTHETISCHE KRAFTSTOFFE

Da erneuerbare synthetische Kraftstoffe in den letzten Jahren zu einem wichtigen Thema im Bereich der Antriebsstrangentwicklung geworden sind, erfordert die Auswahl der vielversprechendsten Kraftstoffkandidaten für zukünftige Fahrzeuganwendungen Kriterien, um Forschungs- und Entwicklungsressourcen zu bündeln. Diese sind:

- Reale CO₂-Reduzierung: Für eine zeitnahe Einführung synthetischer Kraftstoffe müssen Fahrzeuge bei momentan Tank-to-Wheel-basierten Regulierungen CO₂-Reduktionen im Fahrbetrieb aufweisen. Anwendungen synthetischer Kraftstoffe sollen hierbei zumindest die CO₂-Emission heutiger fossiler Kraftstoffe (Diesel als Benchmark) nicht überschreiten
- Schadstoffreduktion: Neue Kraftstoffe sollten nicht ausschließlich die CO₂-Emission, sondern auch Schadstoffe vermeiden.
- Verfügbarkeit und Kosten: CO₂-Vermeidung ist eine Aufgabe, die zeitnahes Handeln erfordert. Die Entwicklung von Standards neuartiger Kraftstoffe und die Einführung in Typgenehmigungsverfahren erfordert großen Aufwand und viel Zeit. Daher sollten genormte Kraftstoffe favorisiert werden, die möglichst global und zu angemessenen Preisen verfügbar sind.

Ausgehend von diesen Anforderungen wurden Dimethylether (DME, CH₃-O-CH₃) und auch Oxymethylenether (OME₁, CH₃-O-CH₂-O-CH₃) als geeignete, vielversprechende Kraftstoffe für motorische Anwendungen im Selbstzünder identifiziert und für die Untersuchungen ausgewählt.

DME ALS ALTERNATIVER KRAFTSTOFF FÜR SELBSTZÜNDER

Im Rahmen des Projekts wurden die Kraftstoffe von fundamentalen Einspritzuntersuchungen über Einzel- und Voll-

motorversuche bis hin zum Einsatz im Fahrzeugdemonstrator untersucht, um ihr Potenzial als Dieseleratz zu bewerten. Im Folgenden werden die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Methylether anhand von DME diskutiert.

PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN

In Bezug auf Emissionsbildung bei der Verbrennung von DME ist festzustellen, dass aufgrund des hohen Sauerstoffgehalts (34,8 % m/m) und des Fehlens von C-C-Bindungen eine nahezu rußfreie Verbrennung darstellbar ist. Ohne Rußemissionen können höhere Abgasrückführ(AGR)-Raten genutzt werden, um gleichzeitig die NO_x-Emission zu reduzieren. In **TABELLE 1** sind die physikalischen Eigenschaften von DME im Vergleich zu Diesel (EN 590) aufgeführt. Die hier aufgezeigten Unterschiede in Heizwert und Dichte sowie Schmierfähigkeit und Viskosität erfordern technische Anpassungen am Tank- und Einspritzsystem für den Betrieb mit DME.

DME ist ein Flüssiggas mit einer zu LPG vergleichbaren Dampfdruckkurve. Von daher können LPG-ähnliche Tanks und Komponenten für die Niederdruckkraftstoffversorgung verwendet werden. Die Komponenten des Systems wurden auf Materialverträglichkeit mit DME geprüft und bei Bedarf (Dichtungen) angepasst. DME wird im gesättigten Zustand je nach Umgebungstemperatur bei einem Tankdruck zwischen 2 und 7 bar gelagert. Das flüssige DME wird aus dem Tank einem Kraftstoffkonditionierungskreislauf mit 20 bis 30 bar zugeführt. Hier ist die Kraftstofftemperatur

	Einheit	EN590 Diesel	DME
Siedepunkt	°C	180 – 350	-24,8
Cetanzahl	-	51 – 54	55 – 60
Dichte (15 °C)	kg/m ³	830	671
Sauerstoffanteil	% m/m	< 1	34,8
Spezifische Verdampfungswärme (25 °C)	kJ/kg	≈ 350	466,9
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm ² /s	≈ 3	0,184 (25 °C)
Verschleißkaltotendurchmesser (HFRR)	µm	460	1180 – 1500 (60 °C)
Unterer Heizwert	MJ/kg	43	27,6

TABELLE 1 Kraftstoffeigenschaften von EN590 Diesel und DME (© Ford)

auf < 40 °C eingestellt, um einen Phasenwechsel zu vermeiden. Im Anschluss erfolgt die Zufuhr zum Einspritzsystem.

DME-COMMON-RAIL-EINSPRITZSYSTEM

Für die Forschungsarbeiten wurde ein Diesel-Common-Rail-Einspritzsystem an die spezifischen Kraftstoffeigenschaften von DME angepasst.

Der niedrige Kompressionsmodul und die Viskosität des DME begrenzen aufgrund von Leckage in der Hochdruckkraftstoffpumpe in der Vergangenheit den maximalen Einspritzdruck auf 600 bar. Die schlechten Schmiereigenschaften von DME erfordern eine Ölschmierung der Pumpe. Die Reduzierung der Totvolumina erlaubt eine Erhöhung des Raildrucks bis 1000 bar. Die magnetischen Servoventile sind trocken ausgeführt, um eine Benetzung und Auflösung der Harze zu vermeiden. Die Dichtungsringe wurden aus DME-beständigem FFKM-Werkstoff hergestellt.

TABELLE 2 zeigt eine Übersicht der Düsenspezifikationen, die während der Einspritzuntersuchungen und der Motorversuche zum Einsatz kamen. Die im Vergleich zu Dieselkraftstoff niedrigeren Werte für Heizwert und Dichte von DME erlauben es nicht den benötigten Energieinhalt in gleicher Zeit in den Brennraum einzubringen, sondern müssen über eine Vergrößerung des Strömungsquerschnitts der Düse kompensiert werden. Hierzu wird der hydraulische Durchfluss der Einspritzdüse um den Faktor 1,8 (PC-1.8) bezogen auf die Referenz-Diesel-Düse (PC-D) erhöht. Der im Vergleich zu Diesel niedrigere anwendbare Raildruck von maximal 1000 bar erfordert ebenfalls eine Anpassung des Durchflussverhaltens einer um den Faktor 2,5 (PC-2.5) skalierten zusätzlichen Düse. Für die Untersuchungen in der Hochdruckkammer wurden spezielle Düsen mit drei Löchern ausgeführt, um den optischen Zugang der einzelnen Einspritzstrahlen zu verbessern. Für die Einzylinderuntersuchungen wurde eine zusätzliche Düse auf Basis der Ergebnisse der CFD-Optimierungen (PC-2.1) bereitgestellt.

Um den Einfluss vergrößerter Düsenlochdurchmesser auf die Einspritzstrahlentwicklung zu charakterisieren, wurden Untersuchungen in einer Hochdruckkammer (High Pressure Chamber, HPC) durchgeführt. Basierend auf der Referenzdüse (PC-HPC-D) des Pkw-Diesel-Brennverfahrens wurden die zuvor beschriebenen skalierten Düsen für DME untersucht.

Mit den optischen Messungen in der HPC kann die zeitliche Entwicklung der makroskopischen Strahlcharakteristika erfasst werden. In den Messungen wur-

Düse	Hochdruckkammer [Lochanzahl × Strahlwinkel / HFR (Name)]	Motorversuch [Lochanzahl × Strahlwinkel / HFR (Name)]
Diesel-Referenzdüse	3 x 154,5° / 217,5 cc/min (PC-HPC-D)	8 x 154,4° / 580 cc/min (PC-D)
Dichte und Heizwert kompensiert (Skalierungsfaktor = 1,8)	-	8 x 154,4° / 1044 cc/min (PC-1.8)
Dichte, Heizwert und Einspritzdruck kompensiert (Skalierungsfaktor = 2,5)	3 x 154,5° / 554 cc/min (PC-HPC-2.5)	8 x 154,4° / 1476 cc/min (PC-2.5)
CFD-optimierte Düse für verbessertes DME	-	8 x 145,3° / 1200 cc/min (PC-2.1)



TABELLE 2 Düsenspezifikation für Einspritzuntersuchungen und Motorversuch (© Denso)

den neben der Gas- und Flüssigkeits-eindringtiefe (Gas Penetration Length, GPL, beziehungsweise Liquid Penetration Length, LPL) auch die Flammenabhebehöhe (Lift-off Length, LOL) ermittelt. Zur Bestimmung der GPL wurden Schlierenbilder eingesetzt und für LOL die Strahlung des angeregten Hydroxylrestes (OH*) gemessen. Die LPL von Diesel wurde ebenfalls durch Schlierenbilder bestimmt. Für DME wurde aufgrund der geringeren Dichte eine Mie-Streulicht-Methode eingesetzt.

BILD 1 zeigt die Ergebnisse der HPC-Messungen bei einem Kammerdruck von $p_a = 50$ bar und einer Temperatur von $T_a = 840$ K für Diesel und DME. Die Umgebungsbedingungen wurden von Lastpunkten des Referenzserienmotors bei Einspritzbeginn abgeleitet. Die Ansteuerdauer des Injektors betrug $t_{en} = 1000$ μ s und der Raildruck wurde auf 1000 bar einge-

stellt. Beim Vergleich der Flüssigkeits-eindringtiefe mit der Referenzdüse (PC-HPC-D) zeigt Dieselkraftstoff einen deutlich längeren Flüssigkeitsstrahl als DME. Dies lässt sich durch den niedrigeren Siedepunkt und Dampfdruck von DME erklären. Hier liegt der Dampfdruck sehr nahe am Umgebungsdruck in der Kammer. Die Phasenänderung von DME von flüssig zu gasförmig erfolgt nahezu unmittelbar, woraus die verkürzte flüssige Eindringtiefe resultiert. Für die Düse mit dem größeren Lochdurchmesser (PC-HPC-2.5) war ein signifikanter Einfluss auf die Flüssigkeits-eindringtiefe bei DME zu beobachten. Während die Eindringtiefe des flüssigen Dieselstrahls nur einen geringen Anstieg aufwies, konnten für DME signifikante Unterschiede aufgrund der stärkeren Kühlwirkung des verdampften Strahls beobachtet werden.

Zur experimentellen Untersuchung der motorischen Verbrennung im Zylinder wurden Einzylindermotoren von dem später untersuchten Vollmotor abgeleitet und mit den angepassten Einspritzsystemkomponenten als Versuchsträger verwendet. Im Experiment wurden charakteristische Lastpunkte basierend auf Kennfelddaten des Serien-Dieselmotors ausgewählt.

Im Folgenden wird ein Betriebspunkt bei mittlerer Last für Diesel und DME näher betrachtet. Die Motorrandbedingungen wurden für die verschiedenen Kraftstoffe und Düsenkonfigurationen nicht geändert. Ansteuerbeginn und -dauer des Injektors sowie die AGR-Rate wurden in Abhängigkeit von Kraftstoff und Düsengröße angepasst, um den Verbrennungsschwerpunkt konstant zu halten. Für die Untersuchungen am Einzylindermotor wurde abweichend zur Serienbedatung des

Innovation in Motion 

Batterie-Systeme



Batterie-komponenten FLEXcooler®



Hochvolt-sicherung für Batterien



Beschichtungen Antriebsstrang / Brennstoffzelle



Vorlade- und Entlade-widerstände



Reibbeläge



Axialfluss-Motoren und -Aktuatoren



Sinterformteile



Hair-Pin Stator Produktion und Anlagen

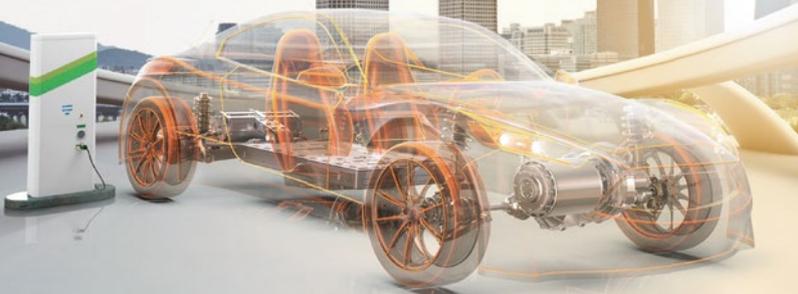


drive the

eVolution

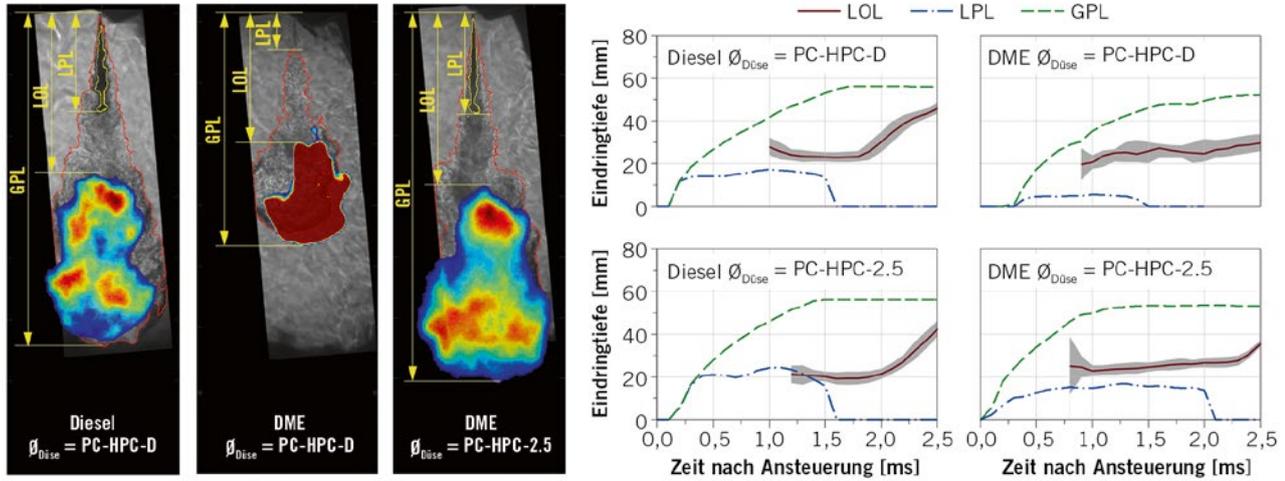
Mit Miba Technologien für die eMobility

Schon heute bietet die Miba eine Reihe an Lösungen für die eMobility. Für Hybridantriebe genauso wie für das rein elektrische Fahren. Als innovativer Partner mit jahrzehntelanger Automotive-Erfahrung gestalten wir die Mobilität der Zukunft und den Markt proaktiv mit, in enger Zusammenarbeit mit unseren Kunden.



evolution@miba.com
www.miba.com

BILD 1 Optische Untersuchungen der Gemischaufbereitung in der Hochdruckkammer [2] (© RWTH Aachen)



Vollmotors lediglich eine Haupteinspritzung appliziert. **BILD 2** zeigt den Vergleich zwischen der Diesel-Basismessung und DME mit zwei unterschiedlichen Düsenlochdurchmessern. Die Diesel-Basis wurde mit der Referenzdüse (PC-D) der Serienkonfiguration gemessen. Für DME wurden die Düsen zur Kompensation der physikalischen Eigenschaften (PC-1.8) und Kompensation des niedrigeren Einspritzdrucks (PC-2.5) untersucht. Zur Anpassung der verschiedenen spezifischen NO_x -Niveaus (ISNO_x) wurde die AGR-Rate angepasst.

Wie in **BILD 2** zu sehen ist, konnten bei DME bei beiden Düsenkonfigurationen keine Rußemissionen entsprechend der Filterrauchzahl (FSN-Wert) selbst bei minimaler NO_x -Emission detektiert werden. Dieses Verhalten ist auf die schnelle Gemischbildung, den hohen Sauerstoffgehalt und den fehlenden C-C-Bin-

dungen [1] zurückzuführen. Die fehlenden C-C-Bindungen führen zur Bildung von CO anstelle von Rußvorläufern im Hochtemperaturpyrolysefall [3].

Die dargestellten spezifischen HC (ISHC)- und CO (ISCO)-Emissionen sind für alle drei Fälle von ähnlicher Größenordnung. Nur bei niedrigen AGR-Raten ist die HC-Emission von DME im Vergleich zu Diesel geringer.

Der maximale Druckanstieg hingegen zeigt Unterschiede zwischen den drei Konfigurationen. Hier zeigt DME trotz der höheren Cetanzahl, die in der Regel zu geringerem Druckanstieg führt, höhere Werte, die sich durch die verkürzte Brenndauer (BD_{5-90}) erklären lassen. Die kleinere Düse (PC-1.8) erscheint somit vorteilhafter, vor allem auch vor dem Hintergrund der hiermit beobachteten höheren applizierbaren AGR-Raten.

Ein weiterer großer Unterschied zwischen DME und Diesel ist in **BILD 2** für den indizierten Wirkungsgrad (η_i) zu sehen. DME weist aufgrund der kürzeren Brenndauer und niedrigeren Abgastemperatur (T_{abg}) einen höheren Wirkungsgrad relativ zu Diesel auf.

VOLLMOTORUNTERSUCHUNGEN FÜR DIE DME-ANWENDUNG IM PKW

Als Versuchsträger für die Untersuchungen am Motorprüfstand und im Fahrzeug wurde ein Ford 1,5-l-Dieselmotor verwendet. Die technischen Daten des Versuchsträgers sind in **TABELLE 3** aufgeführt. Die Motorhardware musste für die DME-Einspritzkomponenten angepasst werden, **BILD 3**. Dabei stellte die Integration der Hochdruckpumpe die größte Herausforderung dar. Aufgrund der mangelnden

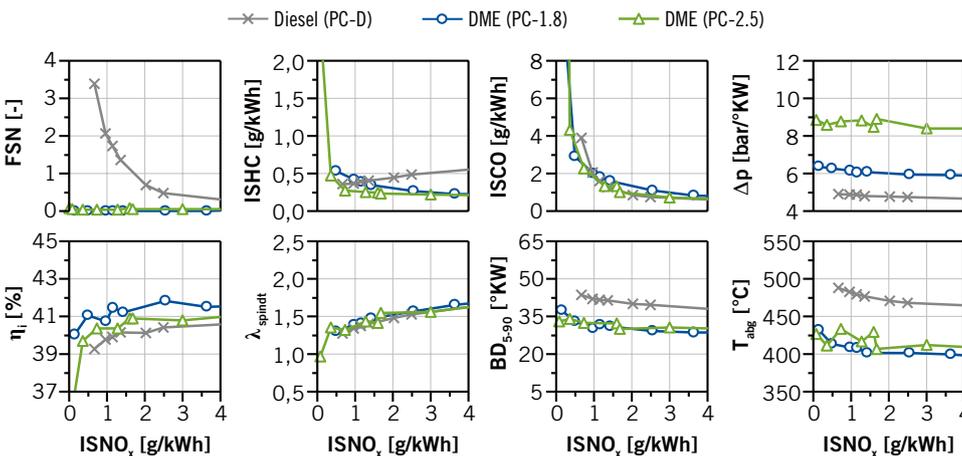
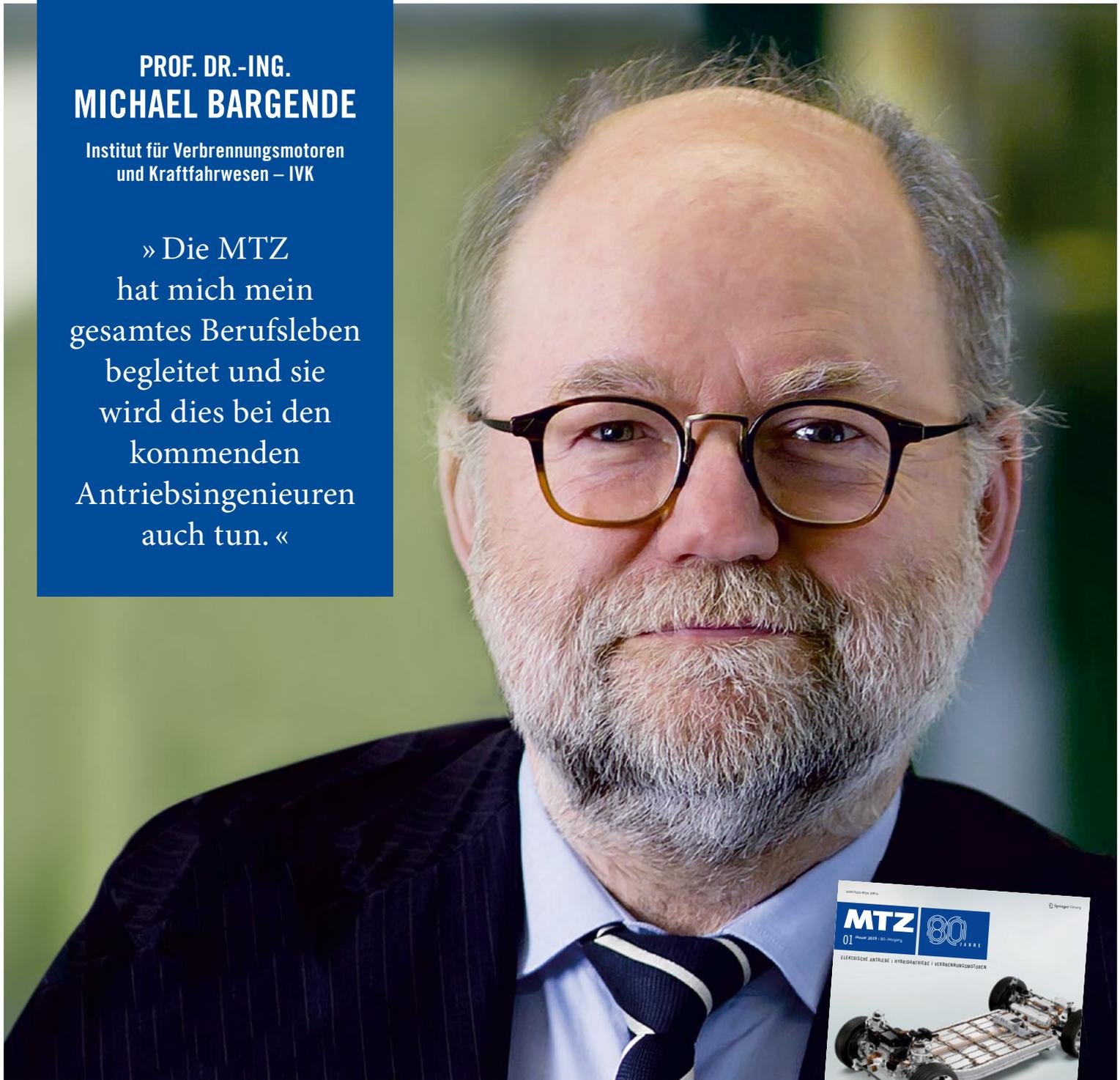


BILD 2 AGR-Variation ($n = 1750/\text{min}$; $p_{m1} = 8,6 \text{ bar}$) der Dieselreferenz (PC-D), DME mit skalierten Düsen (PC-1.8 und PC-2.5) (© RWTH Aachen)

PROF. DR.-ING.
MICHAEL BARGENDE

Institut für Verbrennungsmotoren
und Kraftfahrwesen – IVK

» Die MTZ
hat mich mein
gesamtes Berufsleben
begleitet und sie
wird dies bei den
kommenden
Antriebsingenieuren
auch tun. «



HIER KOMMEN DIE EXPERTEN ZU WORT

Seit 80 Jahren begleitet MTZ erfolgreich die Entwicklung von Motor und Antriebsstrang. Das international führende technisch-wissenschaftliche Fachmagazin für Entscheider in der Antriebsentwicklung und -produktion versteht sich als eine Informationsplattform zu zukünftigen Antrieben – elektrisch und verbrennungsmotorisch.

Motorspezifikation	Einheit	Ford 1.5 I R4 88 kW TDCi
Brennverfahren	–	Selbstzündung, Viertaktmotor
Motorhubraum	cm ³	1499
Maximale Leistung	kW bei 1/min	88 bei 3600
Maximales Drehmoment	Nm bei 1/min	270 bei 1500-2500
Verdichtungsverhältnis	–	16,0
Hub	mm	88,3
Bohrung	mm	73,5
Aufladung	–	VTG (einstufig)
Abgasrückführung	–	Hochdruck, gekühlt

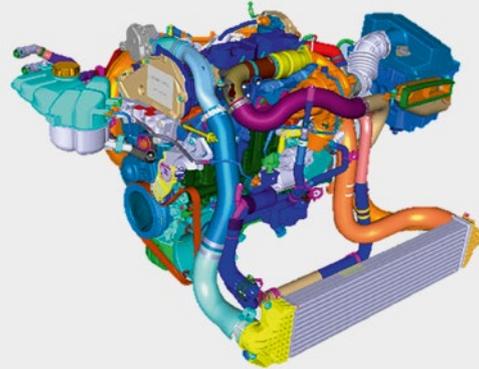


TABELLE 3 Spezifikation des Versuchsmotors (© Ford)

Schmierfähigkeit von DME wurde die Schmierung der Pumpe durch das Motoröl sichergestellt. Eine Anpassung des Riementriebs war aufgrund der abweichenden Phasenlage der Pumpe erforderlich.

Zusätzlich zur Modifikation der Motorhardware mussten neue Sensoren und Stellglieder zur Regelung des Kraftstoffhochdrucksystems in die Motorsteuerung integriert werden, um den Motorbetrieb unter stationären und transienten Bedingungen zu ermöglichen. Die Motorsteuerung verblieb mit Ausnahme der Einspritzparameter im Seriensteuergerät, während das DME-Einspritzsystem von einem zweiten Steuergerät geregelt wurde. Beide Steuergeräte kommunizieren

über eine spezifische CAN-Schnittstelle miteinander.

Die Messungen am Vollmotor wurden an zehn Teillast- und drei Volllastbetriebspunkten durchgeführt. Exemplarisch wird an einem Betriebspunkt ($n = 2000/\text{min}$, $p_{me} = 7,0 \text{ bar}$) der Ansatz für eine optimierte Kalibrierung im DME-Betrieb gezeigt, BILD 4. Ausgehend von einer Messung bei konstanter NO_x -Emission unter weitgehender Beibehaltung der Dieselkalibrierung und der entsprechenden Randbedingungen wurden Variationen des Raildrucks, der Verbrennungsschwerpunktlage und des Verbrennungsluftverhältnisses vorgenommen. Abweichend zur Diesel-Basis wurde bei den Messungen mit

DME auf die Voreinspritzung verzichtet, weil die Versuche am Einzylindermotor vielsprechende Ergebnisse hinsichtlich des Geräuschverhaltens für eine Einfach-einspritzungsstrategie in Kombination mit hohen AGR-Raten und Raildruckabsenkung bei Verwendung der kleinen Düse zeigten.

Ziel der Einzelvariationen war es, einen maximal möglichen Wirkungsgrad bei minimaler CO-Emission zu erreichen. Aufgrund der kürzeren Brenndauer und der damit verbundenen geringeren Abgastemperatur von DME relativ zu Diesel stellte der Turbolader einen der limitierenden Faktoren dar. Daher wurde die Optimierung bei einer relativ hohen spezifischen NO_x -Emission ($2,0 \text{ g/kWh}$) durch-

Wissenstransfer vom Einzylinder- auf den Vollmotor

- Integration der Brennverläufe in ein GT-Power-Vollmotormodell zur ersten Potenzialabschätzung
- Übertragung der Applikationsempfehlung in die Motorsteuerung des Vollmotors

Integration der ölgeschmierten Hochdruck-Kraftstoffpumpe

- Integration in den Motorölkreislauf
- Entnahme in der Ölversorgung des Abgasturboladers
- Rücklauf in den Ölrücklauf des Abgasturboladers
- Anpassung des Befestigungskonzepts

Integration der Kraftstoffinjektoren

- Ausrichtung des elektrischen Anschlusses und des Hochdruckanschlusses entsprechend Serieninjektor
- Der Serienspannpratze entsprechende Aufnahme am Injektorkörper
- Angepasster Durchmesser des Injektorkörpers
- Konstante Düsenhöhenlage

Integration des Hochdruckrails

- Anpassung der Befestigungskonzepts
- Anpassung des Railzulaufs
- Anpassung der Hochdruckleitungen

Aufbau eines neuen Niederdruck-Kraftstoffsystems

Integration eines Drucktanks, einer Tank-Vorfördereinheit, einer Kraftstoffkühlung und einer zweiten Kraftstoffpumpe zur Sicherstellung von 30 bar Kraftstoffdruck am Hochdruckpumpeneintritt

Anpassung des Riementriebs

Angepasster Riemen-spanner aufgrund anderer Schwingungsanregung des Riemens durch ein unterschiedliche Pumpenphasenlage

BILD 3 Notwendige Anpassungen der Motorhardware (© IAV)

geführt, um Spielraum hinsichtlich der VTG-Position zu gewährleisten.

Eine Raildruckabsenkung auf 350 bar bei gleichzeitiger Anpassung des Einspritzbeginns zeigte hierbei Vorteile hinsichtlich CO und Wirkungsgrad. Während der indizierte Hochdruckwirkungsgrad mit reduziertem Raildruck erwartungsgemäß abnahm, stieg der effektive Wirkungsgrad. Dies lässt sich zum einen durch geringere Reibungsverluste aufgrund einer geringeren Pumpenantriebsleistung erklären. Zum anderen verlängert sich die Brenndauer mit geringerem Raildruck im Vergleich zur Basismessung mit 720 bar. Aufgrund der somit steigenden Abgasenthalpie wird der Turbolader bei höheren Wirkungsgraden betrieben, und die Ladungswechselverluste sinken. Eine weitere Absenkung des Raildrucks auf unter 350 bar brachte keinen Vorteil. Ein ähnlicher Trend konnte für die Variation der Verbrennungsschwerpunktlage beobachtet werden. Hier führte eine Frühverschiebung zu einem verbesserten Wirkungsgrad bei nahezu gleicher CO-

Emission. Die Variation des Verbrennungsluftverhältnisses zeigte, dass die Verbrennung mager bei mindestens $\lambda = 1,5$ stattfinden sollte. Eine stöchiometrische Verbrennung ähnlich wie bei Ottomotoren konnte, aufgrund der Abnahme des Wirkungsgrads und des deutlichen Anstiegs der CO-Emission, die deutlich oberhalb der Werte eines modernen Ottomotors mit Benzin-Direkteinspritzung lagen, nicht realisiert werden.

Zusätzliche Abgaskomponenten wurden mit einem Partikelzähler und einem Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) gemessen. Die CH_4 -Emission nach dem Dieseloxydationskatalysator wurde durch die Variation des Raildrucks und des Verbrennungsschwerpunkts nicht beeinflusst. Sie stieg jedoch mit abnehmendem Verbrennungsluftverhältnis an und fand ihr Maximum von circa 140 ppm bei $\lambda = 1,1$. Die weitere Absenkung des Verbrennungsluftverhältnisses auf $\lambda = 1,0$ führte zu einer Reduktion von CH_4 auf ein Emissionsniveau nahe der Nachweisgrenze. Hier

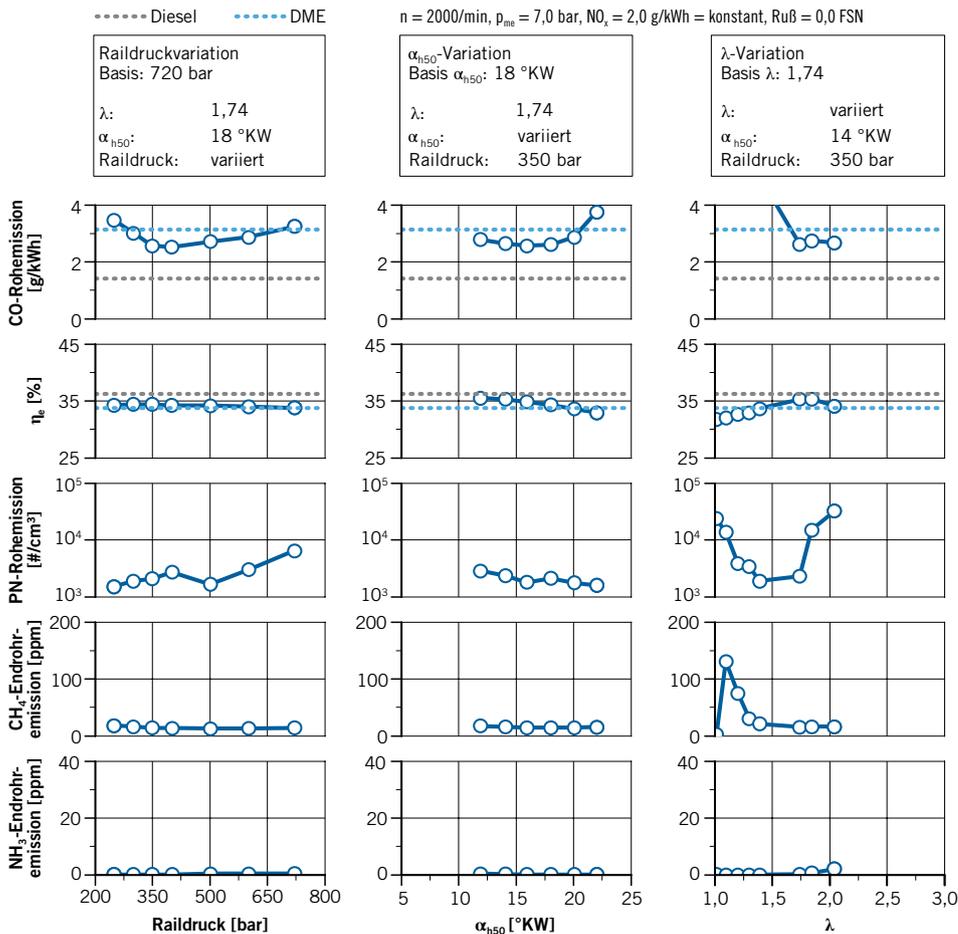


BILD 4 Optimierung für $n = 2000/\text{min}$, $p_{me} = 7,0 \text{ bar}$ bei konstanter NO_x -Emission (© IAV)

FORSCHUNG. WISSEN. FORTSCHRITT.

Die Zukunft entwickeln – die Produktionsanlagen von heute müssen zukünftigen Anforderungen gerecht werden. Das ist die Herausforderung bei der Herstellung von Fahrzeugen. Innovationen für Fertigungsprozesse, Ressourcennutzung, Effektivität der Wertschöpfungsketten sowie zunehmende Automatisierung und Digitalisierung bestimmen die intelligente Automobilproduktion. ATZproduktion bietet hochaktuelle Informationen aus Forschung und Entwicklung und berichtet technisch fundiert über alle Themen der gesamten Fahrzeugherstellung. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

ATZ produktion



7 AUSGABE KOSTENLOS!



www.mein-fachwissen.de/ATZproduktion

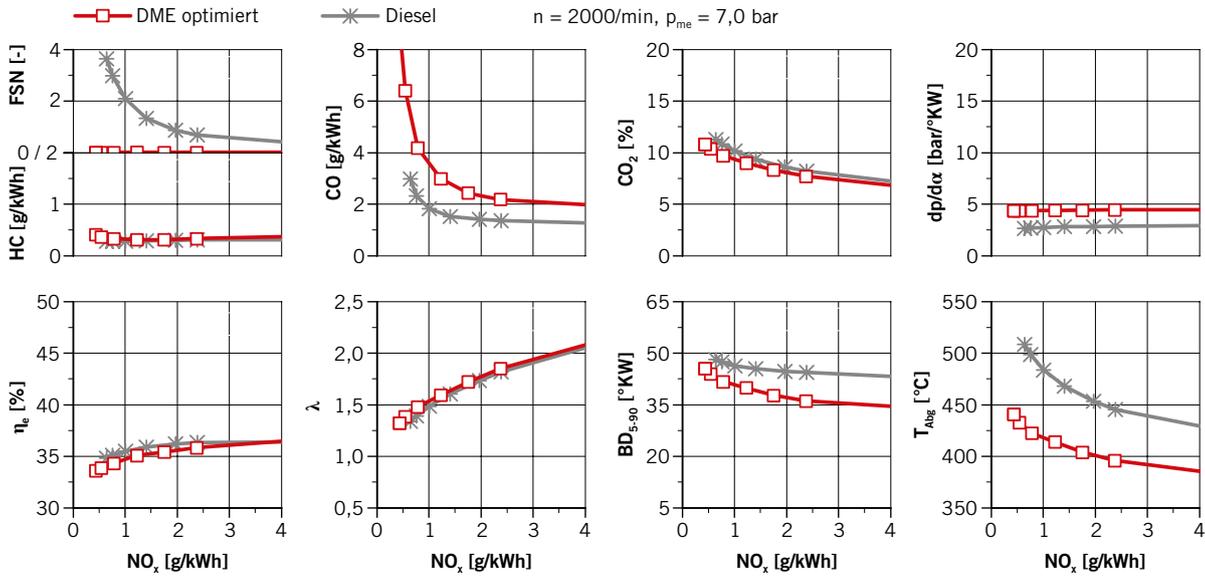


BILD 5 AGR-Variation nach Optimierung für $n = 2000/\text{min}$, $p_{me} = 7,0 \text{ bar}$ (© IAV)

stieg die Abgastemperatur so stark an (circa 550 °C), dass der Schwellwert für die CH₄-Umwandlung im Katalysator überschritten wurde. Bei niedrigen Lasten konnte dieser Schwellwert des insgesamt niedrigen Abgastemperaturniveaus jedoch nicht erreicht werden. Die Rohemission der Partikelanzahl (PN) blieb innerhalb der in BILD 4 dargestellten Variationen deutlich unterhalb der Werte moderner Ottomotoren mit Direkteinjektung, war jedoch in anderen Betriebspunkten tendenziell höher beziehungsweise auf gleichem Niveau.

Die abschließende AGR-Variation wurde auf Grundlage der bei der Optimierung gewonnenen Erkenntnisse durchgeführt, BILD 5.

Der Wirkungsgrad bei der Messung mit optimierter Kalibrierung entsprach nahezu dem des mit Diesel betriebenen Motors. Aufgrund des günstigeren H/C-Verhältnisses relativ zu Dieselmotor bot DME einen Vorteil hinsichtlich der CO₂-Emission. Die CO-Emission war nach wie vor hoch.

Die aus der Optimierung der stationären Betriebspunkte abgeleitete kennfeldweite

Kalibrierung, welche die Verwendung eines DeNO_x-Systems und eines Dieselpartikelfilters weiterhin vorsieht, ist in BILD 6 dargestellt.

Zum finalen Potenzialnachweis von DME als Dieseleratzkraftstoff wurde ein Demonstratorfahrzeug basierend auf einem Ford Mondeo mit angepasster Motorhardware und Tanksystem entwickelt, in dessen Entwicklung die in den Prüfstandsuntersuchungen gesammelten Erkenntnisse einfließen.

Das Emissionspotenzial von DME im WLTC im Vergleich zu Dieselmotor

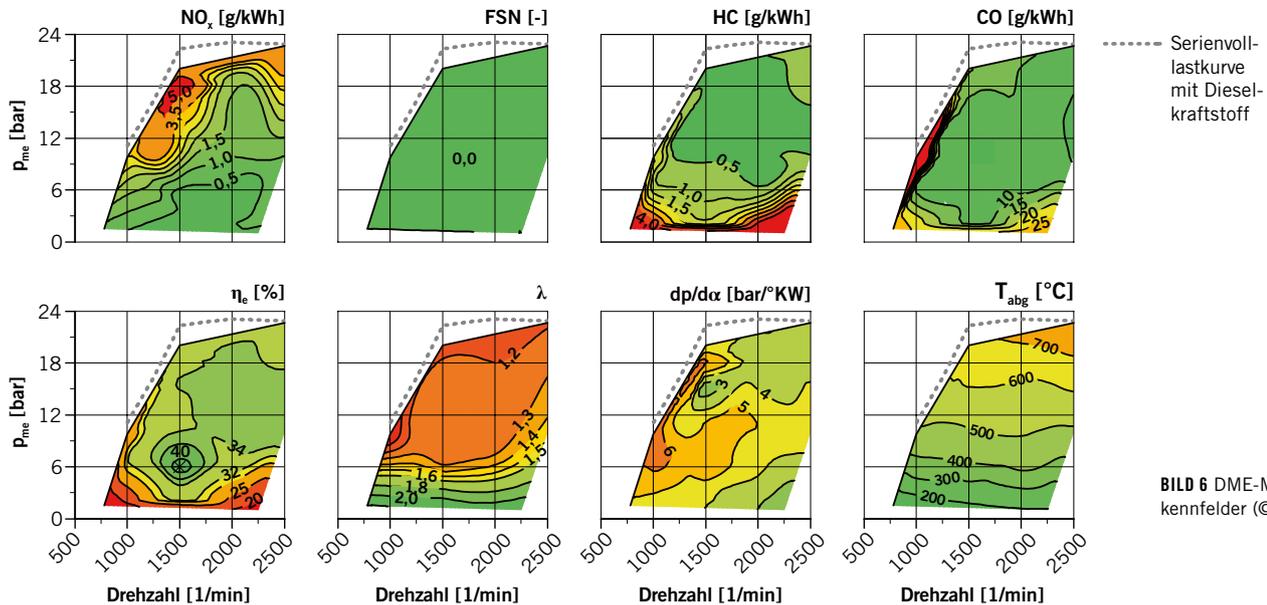


BILD 6 DME-Motorkennfelder (© IAV)

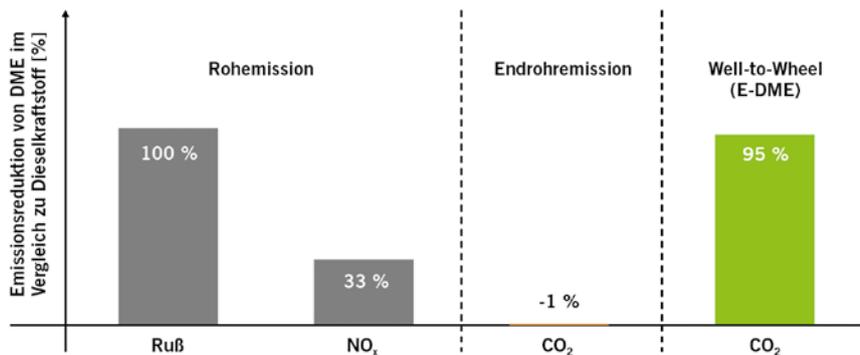


BILD 7 Emissionsvorteile von DME relativ zum Dieselfuelstoff im WLTC (© IAV)

ist in **BILD 7** dargestellt und hinsichtlich der Rohemission von Partikeln und NO_x sowie der CO₂-Emission nach Abgasnachbehandlung bewertet. Der für die klassische Dieserverbrennung charakteristische Ruß-zu-NO_x-Zielkonflikt war für eine DME-Verbrennung nicht mehr vorhanden. Die Partikelmasse konnte auf ein Null-Emissionsniveau gebracht werden, während die NO_x-Emission relativ zum Dieselfuelstoff ebenfalls signifikant (-33 %) reduziert werden konnten. Das CO₂-Emissionsniveau blieb nahezu gleich. Wird DME aus regenerativen Quellen gewonnen (E-DME) und mit einer Well-to-Wheel-Bilanzierung kombiniert, kann ein nahezu CO₂-neutraler und schadstoffarmer Betrieb dargestellt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des durch das deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Fachprogramms „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ wurden Methylether Kraftstoffe (DME/OME_i) im Projekt „XME-Diesel“ als nachhaltige Kraftstoffe für dieselmotorische Anwendungen im Pkw- und Nutzfahrzeugbereich erforscht. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anforderungen an zukünftige nachhaltige Kraftstofflösungen für Verbrennungsmotoren (TtW-CO₂- und Emissionsreduktion, verfügbare Normen, globale Verfügbarkeit und niedrige Kosten) erwies sich insbesondere DME als vielversprechender Kandidat als Ersatz für fossilen Dieselfuelstoff. Im Rahmen des Projekts wurde die Leistungsfähigkeit von DME von grundlegenden Einspritzkammermessungen über Einzylinder- und

Vollmotortests bis hin zu Demonstratorfahrzeugen (Ford Mondeo) analysiert und demonstriert.

LITERATURHINWEISE

[1] Westbrook, C. K.; Pitz, W. J.; Curran, H. J.: Chemical kinetic modeling study of the effects of oxygenated hydrocarbons on soot emissions from diesel engines. In: The journal of physical chemistry A (2006), 110 (21), 6912–6922

[2] Ottenwaelder, T.; Pischinger, S.: Effects of Biofuels on the Mixture Formation and Ignition Process in Diesel-Like Jets. SAE Technical Paper 2017-01-2332, 2017

[3] Fischer, S. L.; Dryer, F. L.; Curran, H. J.: The reaction kinetics of dimethyl ether. I: High-temperature pyrolysis and oxidation in flow reactors. In: International Journal of Chemical Kinetics (2000), 32, 713-740

DANKE

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Projekts und dem TÜV Rheinland, insbesondere Dr. Bernhard Koonen, und der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) für die organisatorische Unterstützung. Darüber hinaus danken die Autoren den Partnern der TU München, Dr. Martin Härtl, Kai Gaukel, M. Sc., und Dominik Pelerin, M. Sc., die das Projekt auf der Nutzfahrzeugseite betreut haben, sowie Oberon Fuels und Prins-Westport.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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

Verschleißschutz genau da wo er gebraucht wird

- Schweißbarkeit & Verpressbarkeit bleibt erhalten durch partielle Behandlung
- Hervorragende Maß- & Formbeständigkeit
- Optimal zur Behandlung von Edelstählen

www.eltropuls.de

Plasmanitrieren
Plasmanitrocarburieren
Oxidieren

ELTROPULS