

Verbundprojekt

C3-Mobility: Closed Carbon Cycle – Mobility: Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

im Rahmen der BMWi-Förderinitiative „Energiewende im Verkehr:
Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe“

Schlussbericht

Beitrag des
Zuwendungsempfängers: Vitesco Technologies
Siemensstr. 12
93055 Regensburg

Zu den Teilprojekten: Einspritzsystem-, Motorbetrieb- und Blenderkennungs-
bewertung für die Nutzung von OME-Diesel Blends für
PKW und leichte Nutzfahrzeuge

Laufzeit: 01.08.2018 - 31.03.2020

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesminis-
teriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 19 | 18006 A geför-
dert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Verbundprojekt:
Closed Carbon Cycle– Mobility:
Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

Dieser Bericht wurde erstellt durch die

Vitesco Technologies

Dr.-Ing. Oliver Kastner



Inhaltsverzeichnis:

1	Kurzdarstellung	8
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	8
1.1.1	Zielsetzung der Arbeitspakete von Vitesco Technologies	10
1.2	Voraussetzungen des Vorhabens	11
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	12
1.4	Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektstart.....	12
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
1.5.1	Zusammenarbeit mit den Partnern	13
1.5.2	Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten und Hochschulen	13
2	Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse.....	14
2.1	Arbeitspaket C6.1 OME-Diesel Blend Brennverfahren für Pkw.....	16
2.1.1	Arbeitspaket C6.1.1 Systemanalyse	16
2.1.2	Arbeitspaket C6.1.2 Einzylindermotoruntersuchungen	22
2.1.3	Arbeitspaket C6.1.3 Vollmotoruntersuchungen	24
2.1.3.1	Stationäre Kennfeldvermessung	25
2.1.3.2	Dynamische Testzyklen (WLTC und RDE)	32
2.1.3.2.1	NO _x Emissionen:.....	33
2.1.3.2.2	Partikelemissionen:	37
2.1.3.2.3	CO ₂ Emissionen:.....	38
2.1.3.2.4	Andere Schadstoffemissionen:.....	39
2.1.3.3	Vorbereitung des Versuchsmotors für Untersuchungen mit OME100%	40
2.1.4	Arbeitspaket C6.1.4 Demofahrzeug.....	43
2.1.4.1	Vortests am Fahrzeug für OME-Diesel Blenduntersuchungen .	43
2.1.4.2	WLTC und RDE Zyklen.....	44
2.1.4.3	Zusammenfassung der Demofahrzeugergebnisse	47
2.2	Arbeitspaket D5a: Bereitstellung der FIE Komponenten für OME Untersuchungen an PKW Motoren.....	48
2.2.1	Definition und Aufbau des FIE Systems für Einzylindermotoruntersuchungen im Arbeitspaket C6.1.2.....	49



Verbundprojekt:

Closed Carbon Cycle– Mobility:

Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

2.2.2 Definition und Aufbau des FIE Systems für Motor- und Fahrzeuguntersuchungen in den Arbeitspaketen C6.1.3 und C6.1.4:.....	50
2.2.3 Lagerungstests mit OME-Diesel Blends:	51
2.2.4 Generische Kavitations- und Erosionsuntersuchungen:	51
2.3 Arbeitspaket D6: Bereitstellung von Kraftstoffsensoren.....	54
2.3.1 Querschnittsarbeit zu Arbeitspaket C1:	54
2.3.2 Querschnittsarbeit zu Arbeitspaket C6.1:	55
2.4 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	57
2.5 Berichte, Vorträge und Veröffentlichungen	57
2.6 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	57
3 References	58

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur des C3-Mobility Projekts.....	9
Abbildung 2: Systemschaubild mit definierten Untergruppen und den zugehörigen Komponenten	17
Abbildung 3: Bewertungstabelle für Komponenten der Systemuntergruppe „Fuel Supply (FIE high pressure system)“ bezüglich Performance und Robustness als Beispiel.....	18
Abbildung 4: Bewertung der Komponenten der Systemuntergruppe „Fuel supply: FIE low pressure system“ mit den in der Paretoanalyse definierten wichtigsten Komponenten (orange Markierungen)	19
Abbildung 5: Bewertung der Komponenten der Systemuntergruppe „Fuel supply: FIE high pressure system“ mit den in der Paretoanalyse definierten wichtigsten Komponenten (orange Markierungen)	19
Abbildung 6: Bewertung der Komponenten der Systemuntergruppe „Exhaust path“ mit den in der Paretoanalyse definierten wichtigsten Komponenten (orange Markierungen)	20
Abbildung 7: Bewertung der Komponenten der Systemuntergruppe „Combustion“ mit den in der Paretoanalyse definierten wichtigsten Komponenten (orange Markierungen)	20
Abbildung 8: Bewertung der Systemuntergruppen für die Nutzung mit OME100%..	21
Abbildung 9: NO _x und FSN Emissionen für den Verbrennungsmodus „Double_EGR“ bei T _{Kühlwasser} = 90°C für Diesel, OME7% und OME15%.....	27
Abbildung 10: NO _x und FSN Emissionen für den Verbrennungsmodus „HP_EGR“ bei T _{Kühlwasser} = 30°C für Diesel, OME7% und OME15%	28
Abbildung 11 Verbrennungsgeräusch und Abgastemperatur T3 (vor Turbolader) für den Verbrennungsmodus „Double_EGR“ bei T _{Kühlwasser} = 90°C für Diesel, OME7% und OME15%	29
Abbildung 12: Gemessene CO ₂ Emissionen (TtW-CO ₂ Emissionen) für den Verbrennungsmodus „Double_EGR“ bei T _{Kühlwasser} = 90°C für Diesel, OME7% und OME15%	31
Abbildung 13: NO _x Emissionen für WLTC Test am Motorprüfstand für die Kraftstoffe Diesel, OME7% und OME15%, alle mit Seriendatensatz gefahren, OME15% noch zusätzlich mit angepasstem Datensatz; Messung am Motorausstritt	33
Abbildung 14: NO _x Emissionen für WLTC Test am Motorprüfstand für die Kraftstoffe Diesel, OME7% und OME15%, alle mit Seriendatensatz gefahren, OME15% noch zusätzlich mit angepasstem Datensatz; Messung nach Abgasnachbehandlung an Position „Tail Pipe“	34



Abbildung 15: Akkumulierte NO _x Emissionen von OME7% und Dieselkraftstoff im WLTP and der Position „Tail Pipe“	35
Abbildung 16: Detailbetrachtungen der NO _x Emissionen für OME7% und Dieselkraftstoff	36
Abbildung 17: Abgastemperaturen vor LNT und vor SCR System für OME7% und Dieselkraftstoff im WLTP	37
Abbildung 18 PM Emissionen für WLTC Test am Motorprüfstand für die Kraftstoffe Diesel, OME7% und OME15%, alle mit Seriendatensatz gefahren, OME15% noch zusätzlich mit angepasstem Datensatz; Messung am Motoraustritt	38
Abbildung 19: CO ₂ Emissionen (TtW und WtW) für WLTC Test am Motorprüfstand für die Kraftstoffe Diesel, OME7% und OME15%, alle mit Seriendatensatz gefahren, OME15% noch zusätzlich mit angepasstem Datensatz; Messung am Motoraustritt	39
Abbildung 20: HC, CO, CH ₄ und NH ₃ Emissionen für WLTC Test am Motorprüfstand für die Kraftstoffe Diesel, OME7% und OME15%, alle mit Seriendatensatz gefahren, OME15% noch zusätzlich mit angepasstem Datensatz; Messung am Motoraustritt	40
Abbildung 21: Versuchsmotors mit ausgetauschten und OME100% resistenten Leitungen für Injektoren und HP-Pumpe	41
Abbildung 22: Übersicht der Mischeinheit für die Kraftstoffzuführung zum Versuchsmotor	42
Abbildung 23: Vortests für Sicherstellung der prinzipiellen Eignung der Fahrzeughardware für Untersuchungen mit OME-Diesel Blends	44
Abbildung 24: a) NO _x und b) PM Emissionen für verschiedene Kraftstoff-Kalibrationskombinationen für WLTC und RDE Zyklen	46
Abbildung 25: CO ₂ Emissionen für verschiedene Kraftstoff-Kalibrationskombinationen für WLTC und RDE Zyklen	47
Abbildung 26: Dieseleinspritzsystem von Vitesco Technologies	48
Abbildung 27: Ergebnis der Lagerungstests mit Dieselkraftstoff (B7) und OME15% Blend mit verschiedenen Dichtungsmaterialien, die in der verwendeten HD-Pumpe, Injektor und PDV (Pressure Decay Valve) zum Einsatz kommen.....	51
Abbildung 28: Prüfstand zur Beurteilung von Kavitation und Erosionsverschleiß (p _{Rail_max} = 500bar, T _{fuel_max} = 150°C)	52
Abbildung 29: Verschleißverläufe Prüföl und OME100%	53
Abbildung 30: FlexFuel Sensor Kennlinie für 2-Butanol-Benzin Gemisch	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der wichtigsten physikalischen und chemischen Unterschiede von Diesel, OME100% und der beiden Blendkraftstoffe OME7% und OME15%	15
Tabelle 2: Übersicht der Umbauarbeiten am Vollmotorprüfstand und Demofahrzeug basierend auf der Systemanalyse in C6.1.1	22
Tabelle 3: Düsenvarianten für „C6.1.2 Einzylindermotoruntersuchung“	23
Tabelle 4: Grunddaten des Motors	25
Tabelle 5: Übersicht der Demofahrzeugtests mit Diesel, OME7% und OME15%	45
Tabelle 6: Düsenvarianten für „C6.1.2 Einzylindermotoruntersuchung“ und deren Status	49
Tabelle 7: Düsenvarianten für „C6.1.3 Vollmotoruntersuchung“ und „C6.1.4 Demofahrzeug“ und deren Status.....	50



1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das Verbundprojekt C3-Mobility will neue Wege in die CO₂-neutrale Mobilität der Zukunft erarbeiten und demonstrieren. Es bezieht sich auf die Förderbekanntmachung „Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe“ des BMWi vom Frühjahr 2017. Dazu hat sich ein umfassendes Konsortium von 28 Partnern aus allen in der Bekanntmachung thematisierten Bereichen gebildet, um die beschriebene Problematik in seiner Gesamtheit angemessen bearbeiten zu können.

Den effektivsten Weg für Transport, Lagerung und Einsatz großer Energiemengen im Verkehr ermöglichen flüssige Energieträger. Am sinnvollsten erscheint zukünftig die Nutzung von regenerativ erzeugtem Kraftstoff auf der Basis von Methanol. Neben dessen direkter Nutzung als Kraftstoff soll auch seine (lokale) Weiterverarbeitung untersucht werden. Weiterhin sollen Ansätze dargestellt werden, schon heute durch Beimischung strombasierter Kraftstoffe (Drop-In Fuel) die Flottenemissionen zu senken. Dazu soll MtG (Methanol-to-Gasoline) in einer Demonstrations-Anlage produziert und seine Nutzung im Ottomotor dargestellt werden. Im Dieselmotor steht 1-Oktanol als Drop-In Fuel zur Verfügung. Für zukünftige Anwendungen werden weiterhin 2-Butanol als Drop-In Fuel, Oktan-Booster und als Reinkraftstoff für Ottomotoren sowie Oxymethylether (OME) und Dimethylether (DME) unter der Berücksichtigung der Vielstofffähigkeit für Dieselmotoren betrachtet.

Die Fahrzeugtauglichkeit der neuen Kraftstoffe soll unter realen Fahrbedingungen validiert werden; ihr Wirkungsgrad und ihre Umweltverträglichkeit sollen in den Herstellungs- und Verbrauchsketten sowie in Vertrieb und Markteinführung gesamtheitlich bewertet werden.

Im Rahmen des Projektes werden ausschließlich Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Die Struktur des Gesamtprojektes findet sich in Abbildung 1. Die Synthese von Methanol (Arbeitspaket A) ist bereits großtechnisch umsetzbar und stellt daher nicht den Forschungsschwerpunkt dieses Projekts dar. Trotzdem müssen die Produktionspfade in der geplanten ganzheitlichen Bewertung, Berücksichtigung finden und daher theoretisch behandelt werden. Außerdem wird für einzelne

Prozessschritte auf den Stand der Technik im Bereich der Methanol-Synthese zurückgegriffen, weshalb dem Thema trotzdem ein eigenes übergeordnetes Arbeitspaket gewidmet ist.

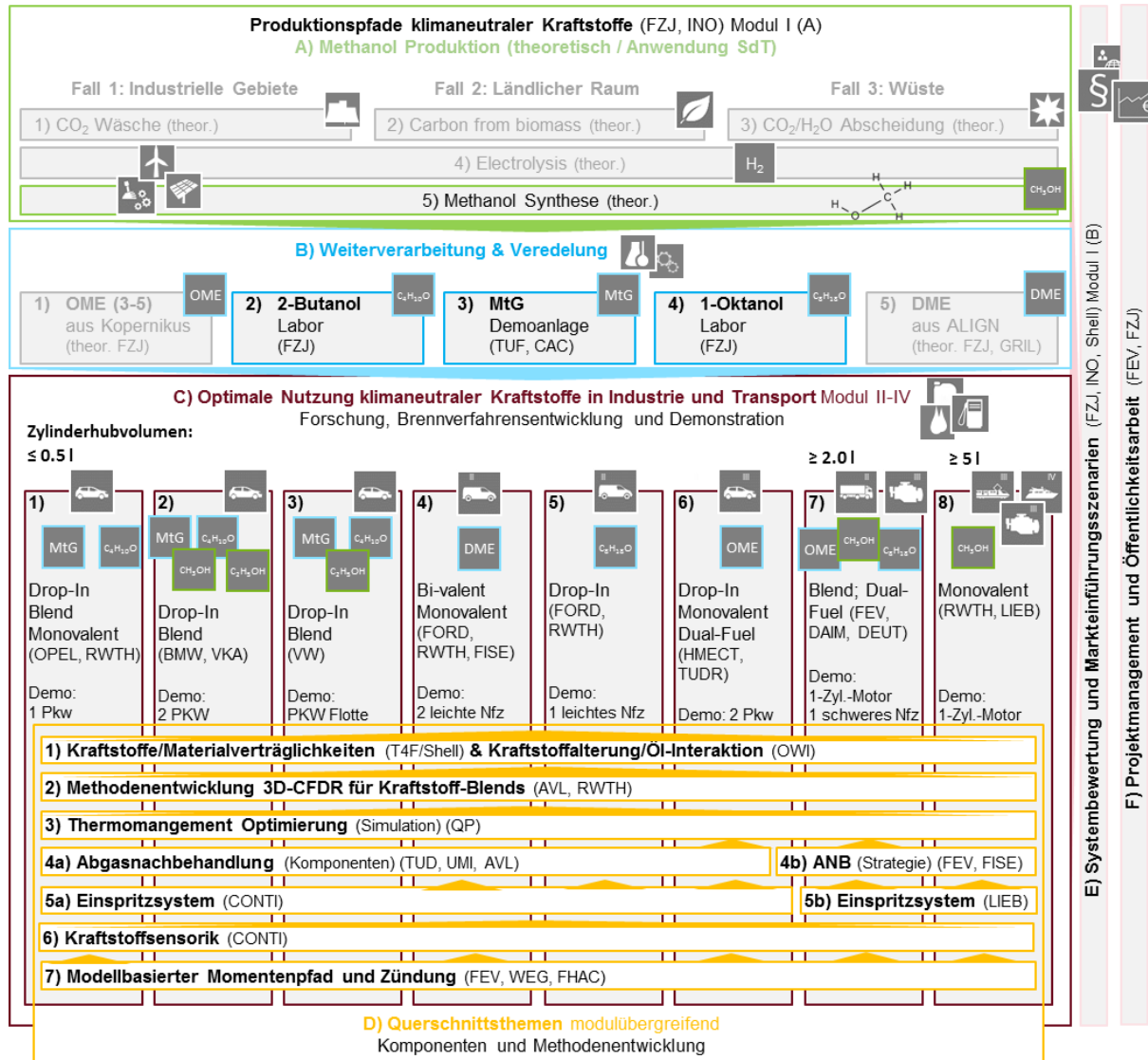


Abbildung 1: Struktur des C3-Mobility Projekts

In einem zweiten übergeordneten Arbeitspaket B werden die Weiterverarbeitung des Methanols zu OME (3-5), MtG und DME sowie die Produktion der (Blend-) Komponenten 2-Butanol und 1-Oktanol behandelt. Die Prozesse für OME (AP B1)) und DME (AP B5)) werden bereits in den Projekten Kopernikus bzw. ALIGN-CCUS behandelt und werden daher nur theoretisch zur ganzheitlichen Bilanzierung mit betrachtet. Schwerpunkt dieses Arbeitspakets stellt daher die Entwicklung und der Aufbau der MtG Anlage (AP B3)) sowie der Alkohol-Komponenten dar. In Bezug auf die Herstellprozesse von 2-Butanol (AP B2)) und 1-Oktanol (AP B4)) basierend auf regenerativer Energie



besteht noch deutlicher Forschungsbedarf, weshalb hierbei die Erforschung im Labormaßstab erfolgt.

In den Arbeitspaketen C1) bis C8) erfolgt die Erforschung und Demonstration der effizienten Nutzung strombasierter Kraftstoffe. Die Anwendungen erstrecken sich dabei von Pkw-Motoren mit otto- und dieselmotorischen Brennverfahren (C1), C2), C3) & C6)) über leichte Nutzfahrzeuge mit dieselmotorischen Brennverfahren (C4) & C5)) zu Schwerlast-Nutzfahrzeug- und Großmotoren (C7) – C8)). In den jeweiligen Arbeitspaketen werden die anwendungs- und kraftstoffspezifischen Problemstellungen erforscht und insgesamt 8 Demonstrator-Fahrzeuge aufgebaut. Darüber hinaus wird in Arbeitspaket C3) die Anwendung des MtG-Kraftstoffes in einer Pkw-Flotte demonstriert.

Die Arbeitspakete C) werden durch modulübergreifende Fragestellungen in den Arbeitspaketen D1) bis D7) begleitet. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen A) bis D) fließen in eine ganzheitliche Analyse und Bewertung der Kraftstoffpfade in Arbeitspaket E) ein, welches auch mögliche Markteinführungsszenarien bewerten, sowie Handlungsempfehlungen für die Markteinführung darstellen soll. In Arbeitspaket F) sind Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit zusammengefasst.

1.1.1 Zielsetzung der Arbeitspakete von Vitesco Technologies

Die Vitesco Technologies wirkt unter dem Titel

„Einspritzsystem-, Motorbetrieb- und Blenderkennungsbewertung für die Nutzung von OME-Diesel Blends für PKW und leichte Nutzfahrzeuge“

in den Arbeitspaketen C6.1, D5a und D6 mit.

Ziel ist die Demonstration der Machbarkeit und effizienten Nutzung von OME-Diesel Blendkraftstoffen in einem PKW-Fahrzeug mit Dieselmotor der neuesten Generation. Zudem wird die mögliche Nutzung von OME100% Kraftstoff in Dieselmotoren betrachtet und Basisuntersuchungen hierzu durchgeführt und unterstützt.

In Arbeitspaket D5a wird das Einspritzsystem für die Nutzung von OME-Diesel Blend und für OME100% definiert und falls notwendig neu aufgebaut, womit auch eine Unterstützung der Arbeiten des Projektpartners TU-Dresden erfolgt.

In Arbeitspaket C6.1 wird gemeinsam mit verschiedenen Arbeitspaketpartner eine Systemanalyse für die Nutzung von OME100% in einem Dieselmotor neuester Generation erstellt. Das Hauptaugenmerk liegt im Arbeitspaket C6.1 aber in einer vollumfänglichen Bewertung der Nutzung von OME-Diesel Blends in einem Dieselmotor neuester Generation. Insbesondere sollen die OME-Blendanteile für die beiden Grenzfälle:

- a) Maximaler OME-Anteil für die Nutzung in einem EU6 Diesel PKW ohne Anpassung der Hardware, Software und der Kalibration



- b) Maximaler OME-Anteil für die Nutzung in einem EU6 Diesel PKW ohne Anpassung der Hardware, Software, aber mit Anpassung der Kalibration

definiert und deren Emissionsverhalten bewertet werden. Final erfolgt die Bewertung der verschiedenen OME-Diesel Blends in einem Demofahrzeug unter realistischen Fahrbedingungen.

In Arbeitspaket D6 sollen als Querschnittspaket zum einen geeignete Sensoren für das Arbeitspaket C1 bereitgestellt werden und zum anderen für das Arbeitspaket C6.1 ein geeigneter Weg für die Blend-Detektion von OME in Diesel aufgezeigt werden.

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Das Projekt entstand auf Initiative der FEV GmbH auf Grundlage der Förderinitiative „Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe“. Somit übernahm die FEV GmbH auch die Konsortialführung. Die Projektbeteiligung von Vitesco Technologies war eingebettet in die Arbeitspakete C6.1, D5a und D6. Es wurde über alle genannten Arbeitspakete hinweg mit diesen verschiedenen Partnern zusammengearbeitet:

- Vitesco Technologies Roding GmbH (zuvor CPT Group Roding GmbH, zuvor Continental Mechanical Components GmbH)
- HMETC
- Lehrstuhl Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme der TU Dresden
- Opel Automobile GmbH (OPEL)
- AVL Deutschland GmbH (AVL)

Der Konsortialvertrag wurde im August 2018 von allen oben genannten und auch allen anderen Partnern des gesamten Konsortiums unterzeichnet. Die Partner verfügen allesamt über das jeweilige Knowhow, das Projekt erfolgreich durchzuführen.

Das Konsortium bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung, beim Projektträger TÜV Rheinland (PT TÜV) für die Abwicklung und bei der FEV GmbH für die Leitung des Konsortiums.



1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Bei der Planung der Arbeitspakete mit Beteiligung von Vitesco Technologies GmbH und auch bei der Planung des Gesamtprojektes C3-Mobility konnte auf die Erfahrungen aus vorangegangenen BMWi- und EU-Projekten zurückgegriffen werden. Die Planung konnte daher – auch aufgrund der guten Kooperation mit den anderen Konsortialpartnern – zügig abgeschlossen und konsequent umgesetzt werden.

1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektstart

Sauerstoffhaltige Kraftstoffe sind prinzipiell seit längerem im Gespräch, da sie im Vergleich zu herkömmlichen, erdölbasierten Kraftstoffen weniger Schadstoffemissionen produzieren. Dies liegt im Sauerstoff begründet, der für die Verbrennung notwendig ist und bereits chemisch gebunden im Molekül mitgeführt wird und nicht, wie bei herkömmlichen Kraftstoffen, über äußere Gemischbildung bereitgestellt werden muss.

Des Weiteren sind synthetisch produzierte Kraftstoffe, und hier insbesondere nachhaltig, über „grüne“ Primärenergie hergestellte Kraftstoffe, sehr attraktiv, um die globalen CO₂ Emissionen zu verringern.

Hier ist OME = Oxymethylenether ein attraktiver „Kandidat“, da dieser Kraftstoff sowohl Sauerstoff im Molekül aufweist als auch nachhaltig hergestellt werden kann. OME kann als Kraftstoff in Dieselmotoren eingesetzt werden.

Die grundsätzliche Eignung von OME als Kraftstoff wurde bereits von Lump B. et al. (Lump B., 2011) im Jahr 2011 aufgezeigt. Hier wurde Versuche an einem LKW Einzylinderversuchsmotor mit OME₁ durchgeführt, und bereits die geringen Rußemissionen erwähnt, die zu einer Aufhebung des Ruß-NO_x Zielkonfliktes führen. In weiteren Veröffentlichungen von Härtl M et al. (Härtl M. S. P., 2014) und (Härtl M. S. P., 2015) und Gaukel K. et al. (Gaukel K., 2016) wurden weitere Motorergebnisse mit OME₁ und OME₂ veröffentlicht.

Der Einsatz von längerkettigen OME_x Molekülen und auch deren Mischungen wurde in den Jahren 2017 ff veröffentlicht. Hier wurden OME₃₋₅ -Diesel Kraftstoffmischungen u.a. bei Kastner O. et al. (Kastner O., 2017), Avolio G. et al. (Avolio G., 2018) und Maus (Maus, 2019) in Basisuntersuchungen an Vollmotoren und WLTP Emissionstests mit einem Versuchsfahrzeug durchgeführt. Wiederum wurde das rußmindernde Potential gefunden.

Eine detaillierte Betrachtung der Verbrennung und des Potentials von OME-Diesel Blends mit den Grenzen der Einsetzbarkeit fehlte aber bis zum Start des C3-Mobility Projektes. Diese Lücke soll nun mit dem Arbeitspaket C6.1 im C3-Mobilityprojekt geschlossen werden. Zusätzlich wird im Arbeitspaket D5a das Einspritzsystem



betrachtet und Anforderungen für die mögliche Nutzung von OME100% Kraftstoff erstellt. Im Arbeitspaket D6 wird dann noch eine Strategie für die Erkennung von OME-Anteilen in einem OME-Diesel Blend erarbeitet, mit denen dann eine Detektion des OMEs im Kraftstoffsystem eines Fahrzeugs möglich sein wird.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

1.5.1 Zusammenarbeit mit den Partnern

Die Zusammenarbeit zwischen den Partner HMETC, Vitesco Technologies Roding GmbH, TU-Dresden und Vitesco Technologies im Hauptarbeitspaket C6.1 war sehr erfolgreich.

In zweiwöchigen, telefonisch durchgeführten Statusbesprechungen wurden die aktuelle Arbeitspaketsituation und das weitere Vorgehen besprochen. In mehrmaligen Statusmeeting, die in Regensburg bei Vitesco Technologies und in Rüsselsheim bei HMETC stattfanden, ist hier insbesondere der offene, kollegiale und freundliche Umgang zwischen den Partnern zu erwähnen.

Neben diesen genannten Kontakten muss auch die gute Zusammenarbeit mit der Konsortialleitung FEV GmbH des C3-Mobility Projektes erwähnt werden. Hier wurde ebenso in freundlicher, zielgerichteter Weise, stets die Ziele des Gesamtprojektes im Blick habend, zusammengearbeitet.

1.5.2 Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten und Hochschulen

Kontakte zu deutschen Forschungsinstituten, Universitäten und Hochschulen prägten die Zusammenarbeit mit externen Stellen.

Hervorzuheben sind die Zusammenarbeit mit dem Arbeitspaketpartner Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren und Antriebssystem der TU-Dresden.

Zudem gab es mehrere Kontakte zum Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der TU Darmstadt als Verantwortlicher des Arbeitspakets D4a.



2 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen erarbeiteten Ergebnisse dargestellt, die von Vitesco Technologies im C3-Mobility Projekt erzielt wurden. Die Aufteilung der Unterkapitel erfolgt nach den bearbeiteten Arbeitspaketen C6.1, D5a und D6. Da es zwischen den Arbeitspaketen C6.1 und D5a, respektive den Kapiteln 2.1 und 0 dieses Berichts, starke inhaltliche Überlappungen gibt, wird der Hauptteil der erzielten Ergebnisse auch im Hauptarbeitspaket C6.1, Kapiteln 2.1, diskutiert. Das Kapitel 0 enthält dann nur noch ergänzende Informationen.

Wie bereits in der Zielsetzung definiert, wurde der mögliche, neue Kraftstoff OME (Oxymethylenether) als Mischung mit oder als Ersatz von Dieselmotoren im Arbeitspaket untersucht. Es wurden Motorenversuchen durchgeführt und ein Demofahrzeug aufgebaut.

OME_x sind sauerstoffhaltige Oligomere, die an den Kettenenden als Methylethergruppen besitzen und eine chemische Struktur $\text{H}_3\text{C-O}-(\text{CH}_2\text{O})_x-\text{CH}_3$ mit $x \geq 2$ aufweisen.

Es sind farblose, bei Raumtemperatur brennbare Flüssigkeiten. OME₁ dahingegen hat einen niedrigen Siedepunkt von 42 °C und ist damit nicht geeignet für die in diesem Förderprojekt gesetzten Ziele genutzt zu werden, da das gesamte Niederdruckkraftstoffsystem nur mit einem erheblichen Aufwand für die Nutzung von OME₁ umgerüstet werden müsste. Die OME_x mit $2 \leq x \leq 6$ und auch Mischungen aus diesen, weisen einen für Niederdrucksystem für Verbrennungsmotoren geeigneten Siedebereich auf, so dass mit möglichst geringen Aufwänden diese eingesetzt werden können. OME_x mit $x > 6$ sind bei Raumtemperatur bereits fest und damit ungeeignet.

Die Tabelle 1 listet in den Spalten zwei und drei die wichtigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften von EN590 Diesel und von OME100%, als Mischungen von OME_x mit $2 \leq x \leq 6$ auf. Die Spalten vier und fünf zeigen die Eigenschaften von OME7% und OME15%. Diese beiden zuletzt genannten sind wiederum Mischungen aus 7 % beziehungsweise 15 % OME100% mit 93 % beziehungsweise 85 % EN590 Diesel. Weitere Informationen zu OME Eigenschaften können in (Lautenschütz L., 2016) und (Han D. Y., 2016) gefunden werden.



Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

Parameter	Diesel	OME100%	OME7%	OME15%
Anteil OME [%]	0	100	7	15
H _u [MJ/kg]	42.3	19.2	40.68	38.84
Dichte [kg/m ³]	831.2	1067.3	844.7	866.2
O ₂ [%]	0	47.5	3.33	7.13
H [%]	14	8.74	13.63	13.21
C [%]	86	44.2	83.074	79.73
L _{min} [kg O ₂ /kg Kraftstoff]	14.65	6.01	14.05	13.36
Cetanezahl [-]	53.2	80.2	54.2	54.8
Anteil OME2 [%]	0	0.14	0.01	0.02
Anteil OME3 [%]	0	47.08	3.30	7.06
Anteil OME4 [%]	0	29.45	2.06	4.42
Anteil OME5 [%]	0	16.67	1.17	2.5
Anteil OME6 [%]	0	5.55	0.39	0.83

Tabelle 1: Übersicht der wichtigsten physikalischen und chemischen Unterschiede von Diesel, OME100% und der beiden Blendkraftstoffe OME7% und OME15%



2.1 Arbeitspaket C6.1 OME-Diesel Blend Brennverfahren für Pkw

Das Hauptarbeitspaket C6.1 unter der Leitung von Vitesco Technologies hat zum Ziel ein Demofahrzeug aufzubauen, das mit OME-Diesel Blendkraftstoff betrieben wird und dieselgleiche oder geringere Schadstoffemissionen produziert sowie geringere CO₂ Emissionen produziert, wenn die Well-to-Wheel (WtW) Betrachtung herangezogen wird.

Das Arbeitspaket ist in 5 Unterarbeitspakete untergeteilt:

- C6.1.0: Projektmanagement
- C6.1.1: Systemanalyse
- C6.1.2: Einzylindermotoruntersuchungen
- C6.1.3: Vollmotoruntersuchungen
- C6.1.4: Demofahrzeug

Das erste Unterarbeitspaket mit der Bezeichnung „Projektmanagement“ wird hier nicht weiter erläutert. Dafür wird nun im Detail auf die von Vitesco Technologies erzielten Ergebnisse der Unterarbeitspakete C6.1.1 bis C6.1.4 eingegangen. Im letzten Unterkapitel erfolgt eine kurze Zusammenfassung.

2.1.1 Arbeitspaket C6.1.1 Systemanalyse

Die Analyse des bestehenden für Dieselkraftstoff ausgelegten Antriebssystems für die Nutzung von OME100% als Kraftstoff wurde von allen am Arbeitspaket beteiligten Partner gemeinsam realisiert.

Zunächst wurde im Hause Vitesco Technologies in Zusammenarbeit mit dem Arbeitspaketpartner HMETC verschiedene Systemuntergruppen mit jeweils einer Liste sämtlicher Komponenten / Bauteile erstellt. HMETC lieferte den Versuchsmotor und auch das Demofahrzeug, das mit einem baugleichen Motor ausgerüstet ist.

Sämtliche Bauteile wurden folgenden Systemuntergruppen zugeordnet:

- Luftpfad (Air path),
- Niederdruckkraftstoffsystem (FIE supply, low pressure system),
- Hochdruckkraftstoffsystem (FIE supply, high pressure system),
- Verbrennung (Combustion)
- Abgaspfad (Exhaust path)

Ein systemisches Übersichtsschaubild des Antriebssystems inklusiv der Systemuntergruppen ist in Abbildung 2 gezeigt.

Verbundprojekt:
 Closed Carbon Cycle– Mobility:
 Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

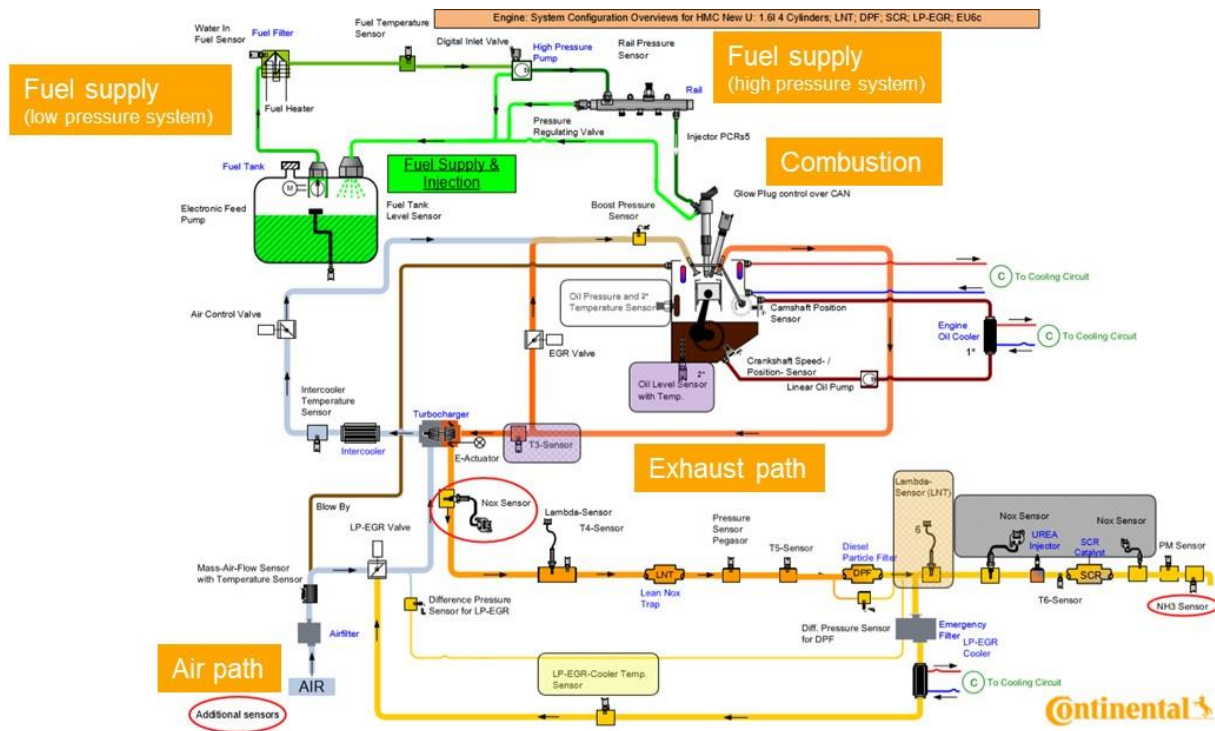


Abbildung 2: Systemschaubild mit definierten Untergruppen und den zugehörigen Komponenten

Im Anschluss erfolgte bei den einzelnen Arbeitspaketpartnern durch Hinzunehmen der jeweiligen internen Experten die Bewertung dieser Komponenten bezüglich der Nutzung von OME100% Kraftstoff in einem Dieselmotor. Diese Bewertung erfolgte für die beiden Kriterien „Performance“ und „Robustness“, mit der Maßgabe, dass das bei der Nutzung des Seriensystems mit Dieselmotorkraftstoff bekannte Systemverhalten zu erreichen ist.

In mehreren gemeinsamen Gesprächen wurden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspaketpartner synchronisiert und eine gemeinsame Bewertung erstellt. Die dort erhaltenen Ergebnisse wurden in einer Liste aufgenommen und weiter bewertet. Als Beispiel hierfür dient die Abbildung 3. Hier ist ein Ausschnitt der Liste dargestellt, der die Bewertung der Komponenten der Systemuntergruppe „Fuel System: high pressure system“ zeigt.

Verbundprojekt:

Closed Carbon Cycle– Mobility:

Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

No.	Sub-System	Principal Component	Detailed Component	Effect on Performance (0 = no, 1 = medium, 2 = strong)	Effect on Robustness (0 = no, 1 = medium, 2 = strong)	Responsible Project partner	Comment
158	Fuel Supply (FIE system)	Digital inlet valve	250h Dauerlauf zeigt keine Auffälligkeiten (2 x OME3-5, 2 x OME1)	1	1	Conti A	FIE System Dauerlauf
159	Fuel Supply (FIE system)	HP-pump	250h Dauerlauf zeigt keine Auffälligkeiten (2 x OME3-5, 2 x OME1), erhöhter Verschleiß am Lager	1	1	Conti A	FIE System Dauerlauf
163	Fuel Supply (FIE system)	Rail	Drosselauslegung zu klären, momentan 0.8 mm	1	1	Conti A	
166	Fuel Supply (FIE system)	Injector PCRs5	Erosiver Verschleiß Ablaufdrossel - 3 x stärkerer Verschleiß	2	2	Conti A	16.10.2018: FIE System Dauerlauf
167	Fuel Supply (FIE system)	Injector PCRs5	Mögliche Ablagerungen durch Additivierung	1	0	Conti A	
168	Fuel Supply (FIE system)	Injector PCRs5	Höhere Leckagetemperatur durch höherem Durchfluss	1	2	Conti A	16.10.2018: Systemanalyse bei Conti
169	Fuel Supply (FIE system)	Nozzle layout	Erosiver Verschleiß Sackloch und Spritzloch und Düsenadelspitze - 3 x stärkerer Verschleiß	2	2	Conti A	16.10.2018: FIE System Dauerlauf
170	Fuel Supply (FIE system)	Nozzle layout	Mögliche Ablagerungen durch Additivierung	1	0	Conti A	
171	Fuel Supply (FIE system)	Nozzle layout	Verkokung im Zusammenhang mit Motoröl	1	0	Conti A	
172	Fuel Supply (FIE system)	Nozzle layout	Sitzverschleiß aufgrund des geringeren HFRR Wertes	1	1	Conti A	
175	Fuel Supply (FIE system)	Sealing on return line of PCRs5	Quickfit aus Kunststoff	1	2	Conti A	16.10.2018: Material überprüfen und evtl. neues auswählen
176	Fuel Supply (FIE system)	HP line HP-pump - Rail	wahrscheinlich keine Probleme	0	0	Conti A	
177	Fuel Supply (FIE system)	HP line Rail - Injector	wahrscheinlich keine Probleme	0	0	Conti A	
178	Fuel Supply (FIE system)	Washer (copper)	Kein Problem	0	0	Conti A	
179	Fuel Supply (FIE system)	Injector control functions	Kalibrationsaufwand notwendig: E-Modul, Viskosität, Dichte, Schalligeschwindigkeit sind unterschiedlich	1	2	Conti A	16.10.2018: HMC & Conti Diskussionen; evtl. Hydraulische Tests bei HMC oder TUDD

Abbildung 3: Bewertungstabelle für Komponenten der Systemuntergruppe „Fuel Supply (FIE high pressure system)“ bezüglich Performance und Robustness als Beispiel

Die Gesamtdarstellung des Ergebnisses bezüglich der Kriterien „Performance“ und „Robustness“ erfolgt nun im Folgenden mit Abbildung 4 bis Abbildung 7 für die Systemuntergruppen:

- Niederdruckkraftstoffsystem (FIE supply, low pressure system),
- Hochdruckkraftstoffsystem (FIE supply, high pressure system),
- Verbrennung (Combustion)
- Abgaspfad (Exhaust path)

Die Bewertung der Systemuntergruppe „Airpath“ wird hier nicht gezeigt, da hier keine Komponenten durch den Wechsel von Dieselmotorkraftstoff auf OME100% Kraftstoff betroffen wären.

Verbundprojekt:
 Closed Carbon Cycle– Mobility:
 Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

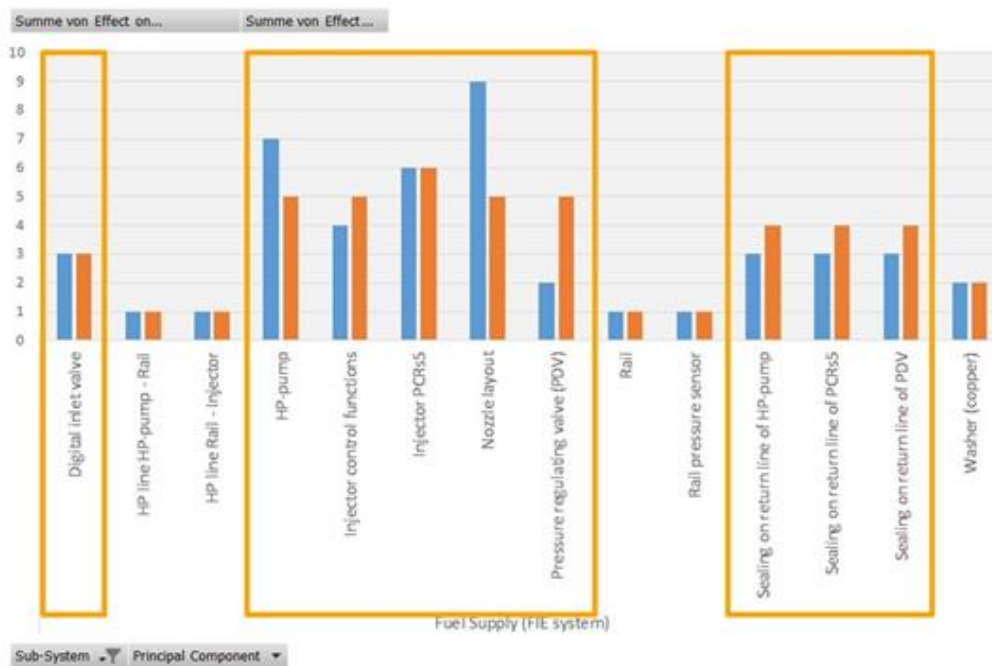


Abbildung 4: Bewertung der Komponenten der Systemuntergruppe „Fuel supply: FIE low pressure system“ mit den in der Paretoanalyse definierten wichtigsten Komponenten (orange Markierungen)

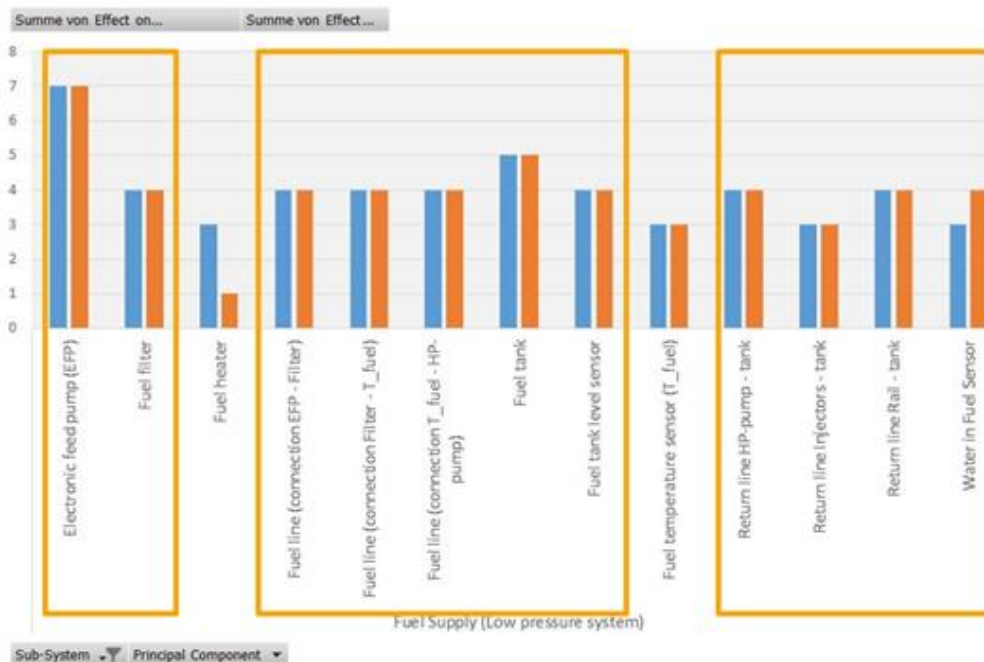


Abbildung 5: Bewertung der Komponenten der Systemuntergruppe „Fuel supply: FIE high pressure system“ mit den in der Paretoanalyse definierten wichtigsten Komponenten (orange Markierungen)

Verbundprojekt:
 Closed Carbon Cycle– Mobility:
 Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

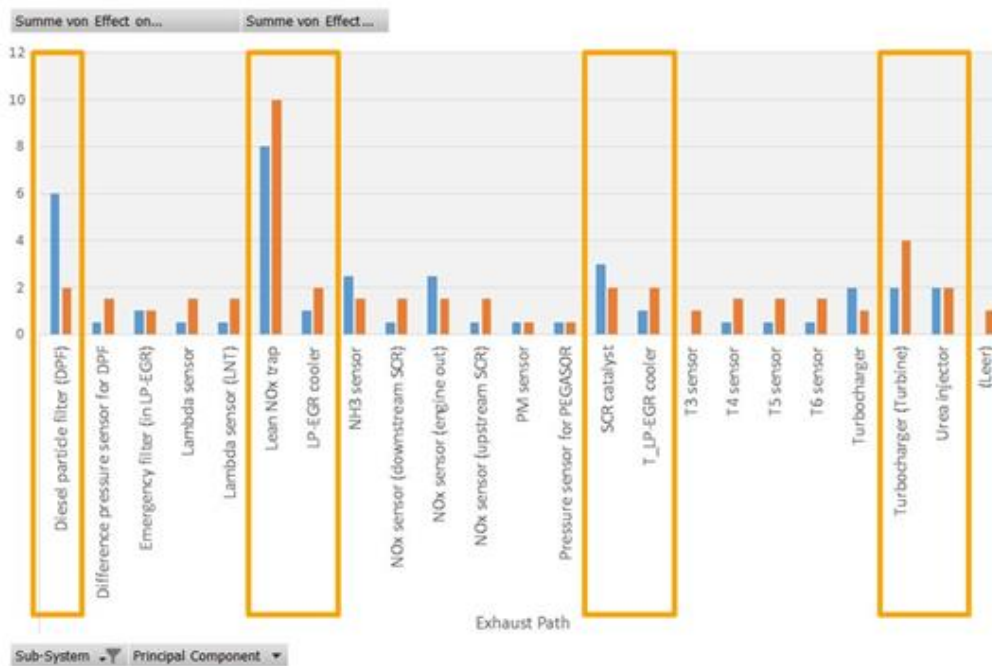


Abbildung 6: Bewertung der Komponenten der Systemuntergruppe „Exhaust path“ mit den in der Paretoanalyse definierten wichtigsten Komponenten (orange Markierungen)

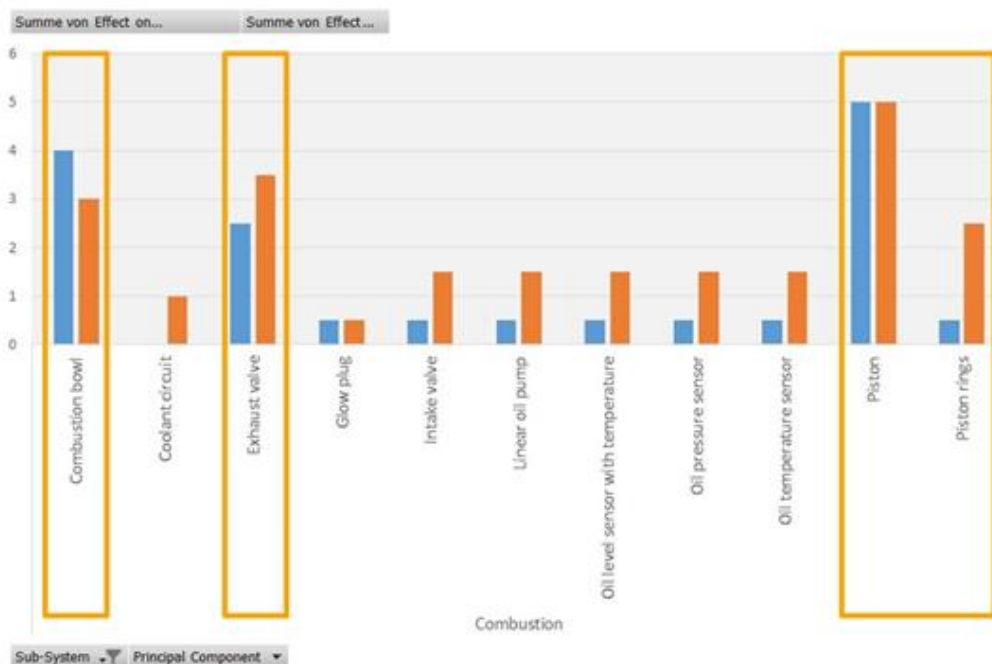


Abbildung 7: Bewertung der Komponenten der Systemuntergruppe „Combustion“ mit den in der Paretoanalyse definierten wichtigsten Komponenten (orange Markierungen)

Die in den auf den vorhergehenden beiden Seiten dargestellten Bewertungen wurden pro Systemuntergruppe zusammengefasst, um so eine Bewertung der Systemuntergruppen gegeneinander zu ermöglichen.

Die Abbildung 8 zeigt nun als Ergebnis die relative Wichtigkeit der Systemuntergruppen zueinander für die beiden genannten Kriterien Performance und Robustness.

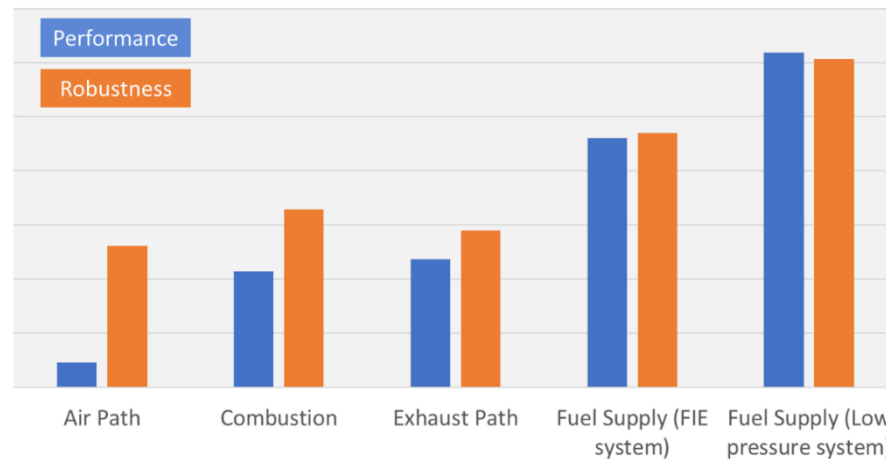


Abbildung 8: Bewertung der Systemuntergruppen für die Nutzung mit OME100%

Es ist sofort deutlich, dass die Komponenten, die in direktem Kontakt mit dem flüssigen OME100% Kraftstoff stehen, als am kritischsten bewertet wurden. Hier ist nochmals das Niederdrucksystem (Fuel supply: Low pressure system) etwas kritischer bewertet als das Hochdrucksystem (Fuel supply: FIE System). Am wenigsten kritisch wurde der Luftpfad (Air Path) bewertet. Beide Kriterien, Performance und Robustness, sind ähnlich und wenig kritisch bewertet worden.

Aufgrund dieser Analyse wurde im Fortgang des Projektes besonders auf die Auslegung des Kraftstoffsystems geachtet. Es wurde ein Arbeitssplit für die Vorbereitungsarbeiten am Vollmotor und Demofahrzeug zwischen den Projektpartner HMETC, Vitesco Technologies und Vitesco Technologies Roding GmbH definiert, der in Tabelle 2 dargestellt ist.

Die hier für Vitesco Technologies definierten Arbeitspakete wurden umgesetzt und werden in den Kapiteln 2.1.3 und 2.1.4 präsentiert.

Thema	Verantwortliche Partner
Injektoren / Düsen	Vitesco Technologies
HP-Pumpe	Vitesco Technologies Roding-GmbH
Fahrzeugauswahl, -bereitstellung	HMETC / Vitesco Technologies
Tankmodul (Auslegung, Design, Bestellung, Aufbau)	HMETC
Verschlauchung vom Tank zum Kraftstofffilter	Vitesco Technologies
Verschlauchung vom Kraftstofffilter zu HP-Pumpe, inkl. aller Rückläufe	Vitesco Technologies
Prüfstandanpassung	Vitesco Technologies
Anpassung der Messtechnik	Vitesco Technologies
Kraftstoffbestellung	Vitesco Technologies / HMETC

Tabelle 2: Übersicht der Umbauarbeiten am Vollmotorprüfstand und Demofahrzeug basierend auf der Systemanalyse in C6.1.1

2.1.2 Arbeitspaket C6.1.2 Einzylindermotoruntersuchungen

Die Einzylindermotoruntersuchungen sind als Grundlagenexperimente für die in den folgenden Kapiteln 2.1.3 und 2.1.4 präsentierten Untersuchungen am Vollmotor und am Demofahrzeug zu verstehen. Der Einzylindermotor befindet sich beim Arbeitspaketpartner TU-Dresden, d.h. die Versuche wurden dort durchgeführt und von Vitesco Technologies stark unterstützt.

Die am Einzylindermotor herausgefahrenen Ergebnisse dienen als Input für die Versuche am Vollmotor und am Demofahrzeug. Daher waren die Untersuchungen am Einzylindermotor den Untersuchungen an den anderen Aggregaten zeitlich vorgelagert.

Die Untersuchungen am Einzylindermotor sind prinzipiell in zwei Phasen zu unterteilen:

1. Phase: Untersuchungen mit OME-Diesel Blendkraftstoffen
2. Phase: Untersuchungen mit OME100% Kraftstoff

In Absprache mit den Projektpartnern Vitesco Technologies Roding GmbH, HMETC und TU-Dresden wurden zu Beginn des Förderprojektes eine erste Auswahl verschiedener Düsenvarianten für die Untersuchungen mit OME-Diesel Blendkraftstoff und für OME100% Kraftstoff definiert. Diese wurden von Vitesco Technologies aufgebaut, an die TU-Dresden geliefert und dort am Einzylindermotor vermessen. Diese sind in der Tabelle 3 unter Nummer 1 – 4 aufgeführt.

Für die Untersuchungen in der ersten Phase (OME-Diesel Blend Kraftstoff) wurden keine dedizierten Düsen ausgelegt, da zwischen allen am Arbeitspaket C6.1 mitwirkenden Partnern entschieden wurde, dass für die Blenduntersuchungen keine

Hardwareänderungen am Motor und somit auch nicht am Einspritzsystem vorzunehmen sind. Weitere Informationen hierzu finden sich in Kapitel 2.1.3.

Bei der Düsenauslegung für Untersuchungen mit OME100% Kraftstoff (Phase 2) wurde darauf geachtet, dass die unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften des OMEs berücksichtigt werden, als auch die Übertragbarkeit auf den in den Arbeitspaketen C6.1.3. und C6.1.4 verwendeten Motor möglich ist.

Nummer	HD [ml/30s]	Loch-anzahl	Höhen-winkel [°]	Produziert	Aufgebaut	Geliefert	Am Einzylindermotor untersucht
1	325	8	158	X	X	X	X
2	650	8	158	X	X	X	X
3	590	8	158	X	X	X	X
4	1000	8	158	X	X	X	X
5	800	8	146	X	X	X	
6	800	8	134	X	X	X	

Tabelle 3: Düsenvarianten für „C6.1.2 Einzylindermotoruntersuchung“

Bei den ersten Untersuchungen dieser Düsen ergaben sich zwei Hauptergebnisse bezüglich des Düsendesigns, die letztlich zu einer neuen Düsenauslegung geführt haben:

1. Die Leistungsanforderung bei den gewählten Motordrehzahlen von 2000 1/min (maximaler Drehmomentpunkt) und 4000 1/min (maximaler Leistungspunkt) konnte weder von der HD590 noch von der HD650 (Nummern 2 und 3 der Tabelle 1) erreicht werden, da der Düsendurchfluss zu gering war. Es wäre eine zu lange Einspritzdauer notwendig gewesen wäre, um die Kraftstoffmenge in den Brennraum einzubringen.
2. Die Strahlage der Spraykeulen im Brennraum ist nicht optimal für die Einspritzung und Verbrennung von OME100% Kraftstoff. Es hat sich bei hohen Lasten (maximaler Drehmomentpunkt und maximaler Leistungspunkt) ein Abschmelzen des Kolbenmuldenrandes genau an den Stellen gezeigt, an denen die Kraftstoffstrahlkeulen diesen Muldenrand treffen. Dieser Schaden wurde mit der HD650 Düse erzeugt, ist aber bei den anderen Düsen mit gleicher Strahlage ebenfalls zu erwarten. Dieses Abschmelzen ist letztlich auf eine deutlich höhere Temperatur während der Verbrennung innerhalb der Strahlkeulen bei OME100% Kraftstoff im Vergleich zu Diesel zurückzuführen. Diese führt dann bei zu langer Verweildauer zu dem weiter oben angesprochenen Schaden am Muldenrand des Kolbens und kann zu einem evtl. massiven Motorschaden führen.



Einen detaillierten Bericht zu den Ergebnissen am Einzylindermotor und im Speziellen zu den beiden oben genannten Punkten findet sich in den Zwischenberichten und im Abschlussbericht des Arbeitspaketpartners TU-Dresden.

Um sowohl die Leistung zu erhöhen als auch das Abschmelzen des Kolbenrandes zu verhindern, wurde nun gemeinsam mit allen am Arbeitspaket C6.1. beteiligten Partner neue Düsenvarianten für die Untersuchungen am Einzylindermotor definiert. Diese sind in Tabelle 3 unter den Nummern 5 und 6 zu finden. Diese Düsen wurden im Dezember 2019 definiert, in Auftrag gegeben und aufgebaut. Im Anschluss werden die Düsen im zweiten Quartal 2020 an die TU-Dresden zur Vermessung am Einzylinder übergeben.

Am Einzylindermotor wird eine Seriidieselpumpe von Projektpartner Vitesco Technologies Roding GmbH verwendet. Hier mussten bisher keine Modifikationen vorgenommen werden. Details hierzu finden sich in den Zwischenberichten des Arbeitspaketpartners Vitesco Technologies Roding GmbH.

2.1.3 Arbeitspaket C6.1.3 Vollmotoruntersuchungen

Die Vollmotormessungen wurden mit Dieseldieselkraftstoff und mit verschiedenen OME-Diesel Blendkraftstoffen realisiert.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den Untersuchungen mit OME-Diesel-Blendkraftstoff erläutert, die im Projektzeitraum erzeugt wurden. Der Motor wurde bei Vitesco Technologies in Regensburg betrieben. Der Motor war der von HMETC gelieferte Motor, dessen Details in Tabelle 4 gelistet sind. Der Prüfstands-, und Messtechnikumbau für die Nutzung von OME-Diesel Blendkraftstoff erfolgte bei Vitesco Technologies in Regensburg.

Es wurden Standarddiesel-Kraftstoff, OME7% und OME15% untersucht. Zunächst wurde stationäre Kennfeldvermessungen mit dem Seriidatensatz für Dieseldieselkraftstoff mit den genannten Kraftstoffen durchgeführt. Nach deren Bewertung wurden dann transiente Fahrzyklen auf dem Motorprüfstand gefahren. Hier wurden der WLTP Zyklus und ein gemeinsam zwischen den Partnern abgestimmter RDE Zyklus gefahren.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der stationäre Kennfeldvermessung und anschließend die Ergebnisse der dynamischen Tests WLTC und RDE behandelt.

Parameter	Wert
Motorhersteller / Motorart	HMC / Diesel
Abgasnorm	EU6dtemp
Zylinderzahl	4
Bohrung / Hub	77 mm / 85.8 mm
Hubraum	1598 cm ³
Kompressionsverhältnis	15.9
Maximal Leistung	98 kW
Einspritzsystem	PCRs5 (Continental)
Max. Kraftstoffdruck	2200 bar

Tabelle 4: Grunddaten des Motors

2.1.3.1 Stationäre Kennfeldvermessung

Die Abbildung 9 bis Abbildung 11 zeigen verschiedene, wichtige Messgrößen der stationären Kennfeldvermessung für zwei verschiedene Kühlwassertemperaturen und auch für zwei Verbrennungsmodi. Diese sind für die drei untersuchten Kraftstoffe, Standarddiesel-Kraftstoff, OME7% und OME15% für die Seriedieselskalibration dargestellt.

Die Abbildung 9 zeigt die NO_x Emissionen (Teilabbildungen a) - c)) und die FSN Emissionen (Teilabbildung d) – f)) für die drei genannten Kraftstoffe. Man erkennt deutlich, dass die roten Bereiche höherer NO_x Emissionen von Diesel über OME7% zu OME15% zunehmen. Dies ist auf die bereits im letzten Zwischenbericht erwähnte Verringerung des Heizwertes der Kraftstoffe, siehe Tabelle 1, in der genannten Kraftstoffreihenfolge zurückzuführen.

Diese Heizwertverringerung führt zu einer Erhöhung der Set-Point Drehmomentwerte für gleiche effektive Drehmomentwerte. Dadurch werden wie üblich in Kennfeldbedeutungen von Dieselmotoren, bei höheren Set-Point Werten eine niedrigere Abgasrückführrate (AGR Rate) angewandt. Zusätzlich hat sich gezeigt, dass OME einen kürzeren Zündverzögerung aufweist und auch der Durchbrand schneller erfolgt. Alle drei Ursachen führen letztlich zu höheren NO_x Emissionen für ein abgegebenes Drehmoment. Dieser Effekt nimmt mit steigendem OME Anteil im Kraftstoff zu.

Neben der Erhöhung der NO_x Emissionen führen die genannten drei Ursachen auch zu einer Verringerung der Rußemissionen. Zusätzlich hierzu führt auch noch der im OME Molekül enthaltene Sauerstoff zu einer signifikanten Verringerung der Rußemissionen und damit der FSN Messwerte für steigende OME Anteile im Kraftstoff. Dies ist in Abbildung 9 d) – f) dargestellt. Die generelle Hauptursache für Rußemissionen ist eine schlechte lokale Gemischbildung. Wenn die Kraftstoffmoleküle nicht mit einer für die vollständige Oxidation notwendigen Zahl an Sauerstoffmolekülen in Kontakt kommen, bleibt die Oxidation des Kraftstoffkohlenstoffs unvollständig und somit auf niedrigeren Oxidationsstufen hängen. Die hier entstehenden Produkte können zum Beispiel CO- und Rußemissionen sein. Aufgrund des im OME Molekül



enthaltenen Sauerstoffs tritt die Gemischbildung zwischen dem Kraftstoff und dem Luftsauerstoff als Ursache der Rußemissionen mit steigendem OME Gehalt in den Hintergrund. Die Rußemissionen sinken nun aufgrund des Sauerstoffgehalts im OME Molekül.

Die Abbildung 10 zeigt wiederum die NO_x und FSN Emissionen für die drei genannten Kraftstoffe. Der Unterschied zu Abbildung 9 besteht in der Kühlwassertemperatur und im aktiven Verbrennungsmodus HP_EGR Modus im Gegensatz zum Double_EGR Modus in Abbildung 9. Die Temperatur wurde für die Messungen in Abbildung 10 auf $T_{\text{Kühlwasser}} = 30 \text{ °C}$ gesetzt. Grundsätzlich ergibt sich bei den kälteren Motorbedingungen die gleichen Ergebnisse mit der gleichen Erklärung, wie für die warme Kühlwasserbedingungen in Abbildung 9. Die in Abbildung 10 b) und c) unten links im Diagramm zu erkennende starke Rotfärbung ist ein Messdateninterpolationsfehler, der sich in der Analysesoftware nicht korrigieren lässt. Dieser Bereich ist daher zu ignorieren.

Die Abbildung 11 zeigt wiederum für die genannten Kraftstoffe das Verbrennungsgeräusch und die Abgastemperatur nun wieder für $T_{\text{Kühlwasser}} = 90 \text{ °C}$ und den Verbrennungsmodus „Double_EGR“. Das Verbrennungsgeräusch ist für alle drei Kraftstoffe sehr ähnlich, was dann auch später im Fahrzeug bestätigt wurde, weil keine Unterschiede in der Geräuschkulisse des Fahrzeugs bemerkt wurde.

Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

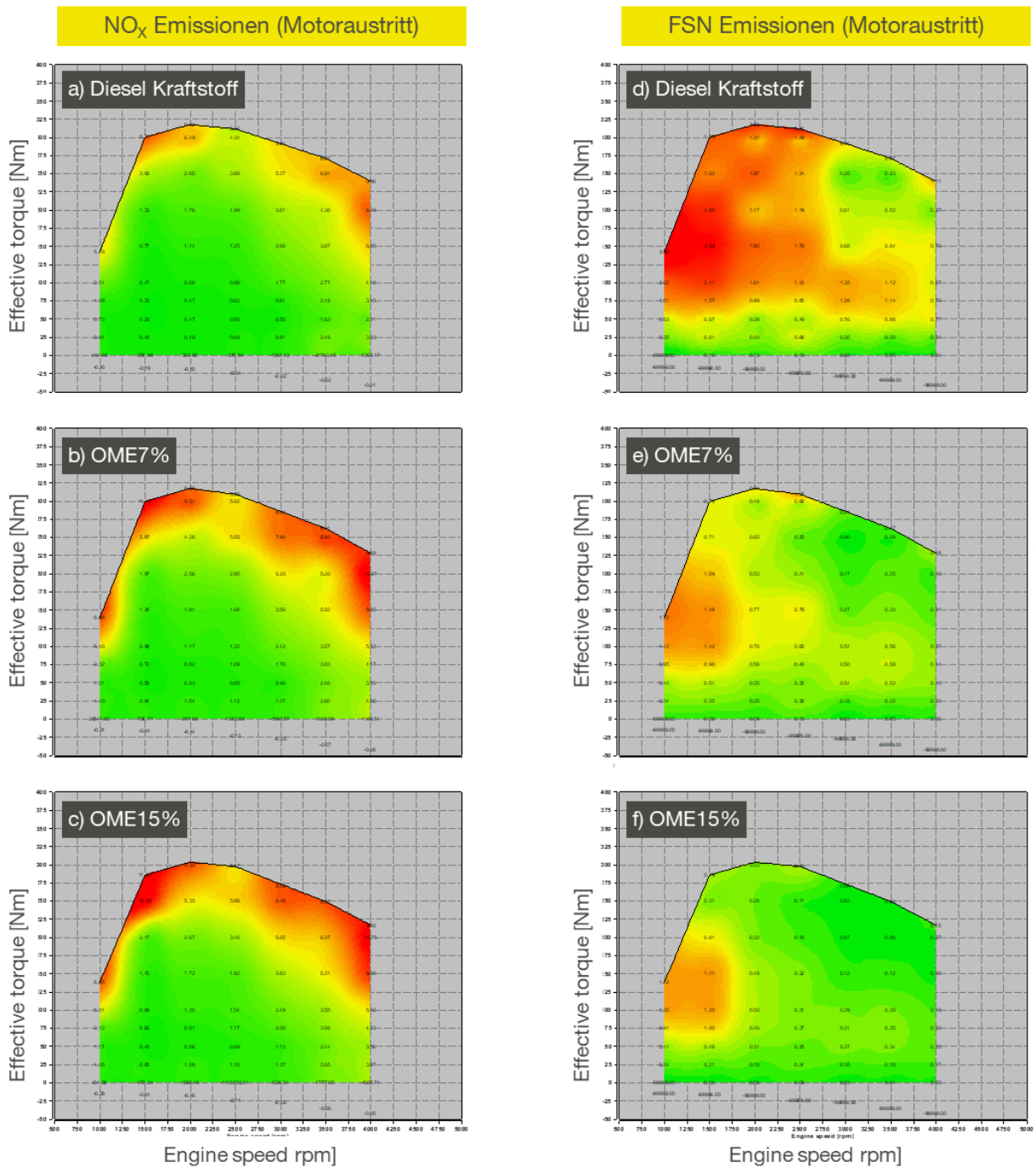


Abbildung 9: NO_x und FSN Emissionen für den Verbrennungsmodus „Double_EGR“ bei T_{Kühlwasser} = 90°C für Diesel, OME7% und OME15%

Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

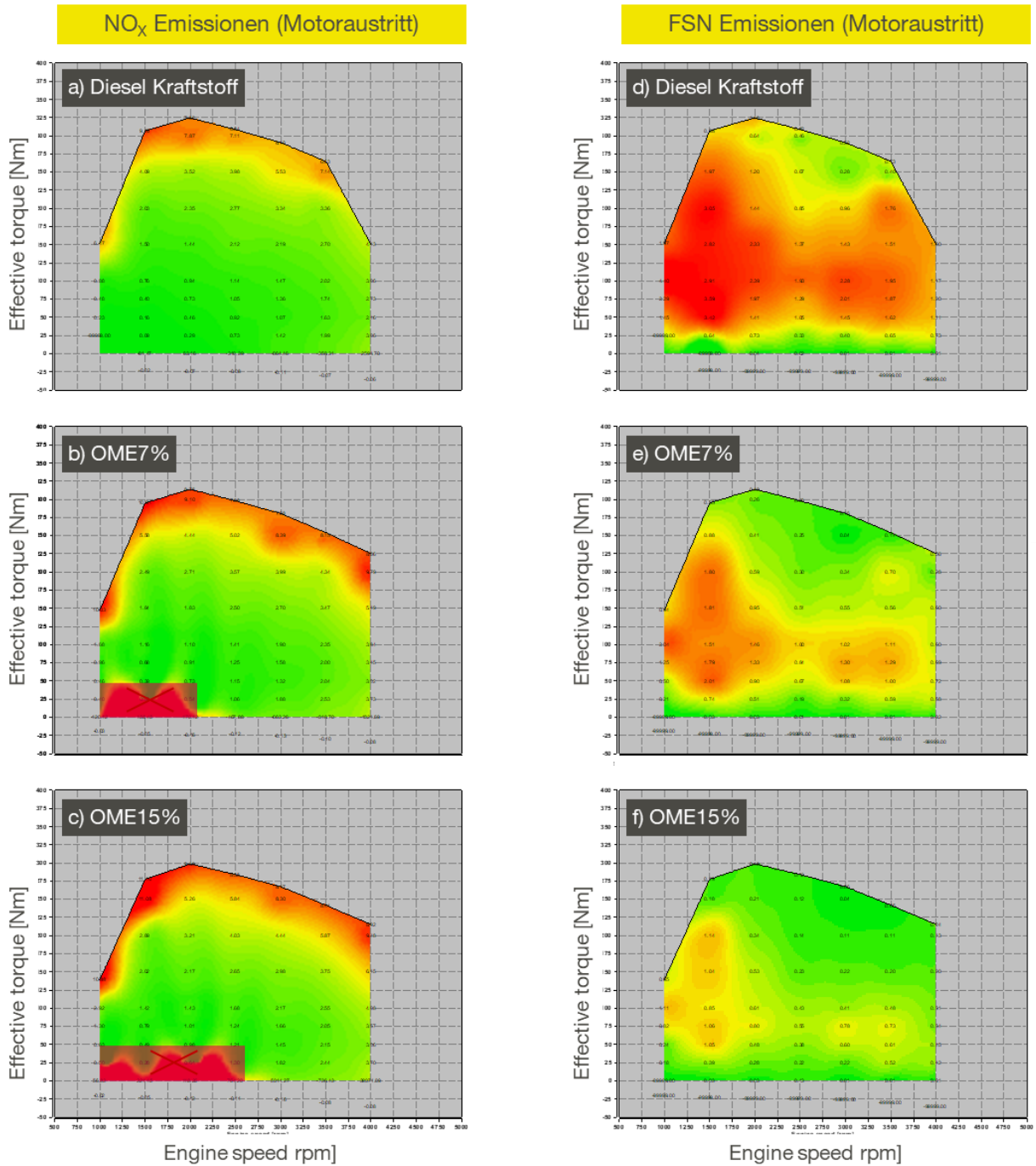


Abbildung 10: NO_x und FSN Emissionen für den Verbrennungsmodus „HP_EGR“ bei T_{Kühlwasser} = 30°C für Diesel, OME7% und OME15%

Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

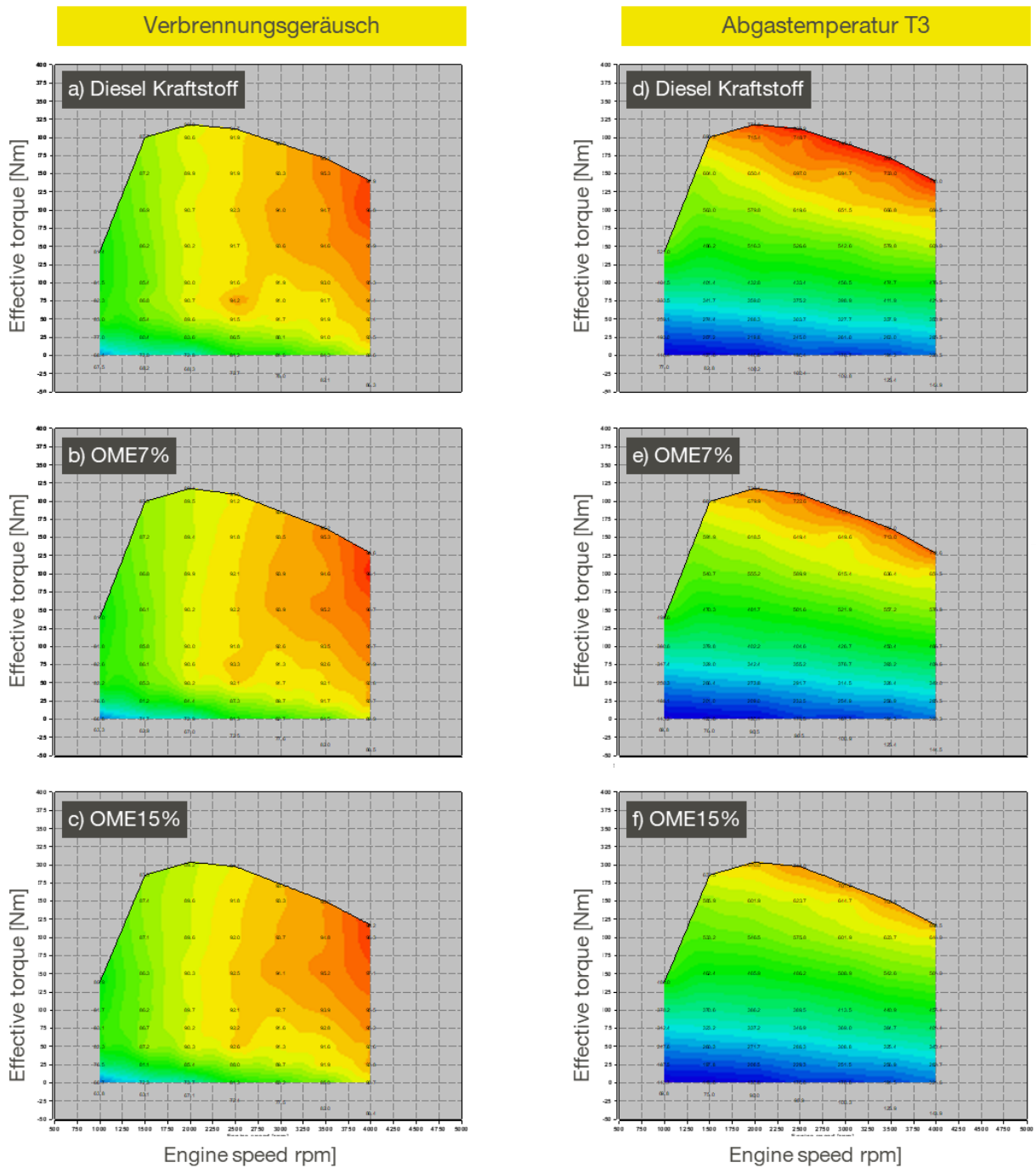


Abbildung 11 Verbrennungsgeräusch und Abgastemperatur T3 (vor Turbolader) für den Verbrennungsmodus „Double_EGR“ bei $T_{\text{Kühlwasser}} = 90^{\circ}\text{C}$ für Diesel, OME7% und OME15%



Die Abgastemperatur T3 verringert sich für steigenden OME Anteil im Kraftstoff. Dies ist wiederum auf die schnellere Verbrennung und auch auf das schnellere Brennende zurückzuführen. Beide Unterschiede führen letztlich zu geringeren Abgastemperaturen. Diese Verringerung führt prinzipiell zu einem etwas schlechteren Druckaufbauverhalten des Turboladers und zu einer langsameren Erwärmung des Abgasnachbehandlungssystems. Letzteres ist für die vorliegende Architektur nicht stark ausgeprägt, da das SCR System als Unterflursystem ausgelegt ist. Damit ist dieses weit von der Messstelle T3 entfernt und der relativ kleine Unterschied in der Abgastemperatur T3 zwischen den drei Kraftstoffen wirkt sich nur gering aus.

Die Abbildung 12 zeigt die CO₂ Emissionen erneut für die drei bereits erwähnten Kraftstoffe. Der CO₂ Ausstoß ist von Diesel ausgehend zwischen 0.3 und 2 % abhängig von Last und Drehzahl für OME15% gestiegen. Aus der Stöchiometrie der Verbrennung der unterschiedlichen Kraftstoffmoleküle herleitend und unter der Annahme eines gleiches Verbrennungswirkungsgrades für beide betrachteten Kraftstoffkomponenten, sollte für OME15% eine Erhöhung der CO₂ Emissionen von ca. 1.6 % im Vergleich zu Diesel gemessen werden. Der hier ermittelte Unterschied liegt zu einem großen Teil im Bereich dieses Wertes.

Aus den Kennfeldvermessung und den bereits im Vorfeld dieser Messkampagne bekannten Ergebnisse mit OME7% in verschiedenen Fahrzyklen (Motorprüfstand und Fahrzeug), kann geschlussfolgert werden, dass mit OME15% ohne Kalibrationsanpassung die Grenzwerte der NO_x Emissionen in den betrachteten Zyklen und auch im Realfahrverhalten nicht mehr erfüllt werden können. Dies ist weiter unten in den folgenden Kapiteln erläutert und lässt sich bereits aus Abbildung 9 und Abbildung 10 herleiten.

Verbundprojekt:
 Closed Carbon Cycle– Mobility:
 Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

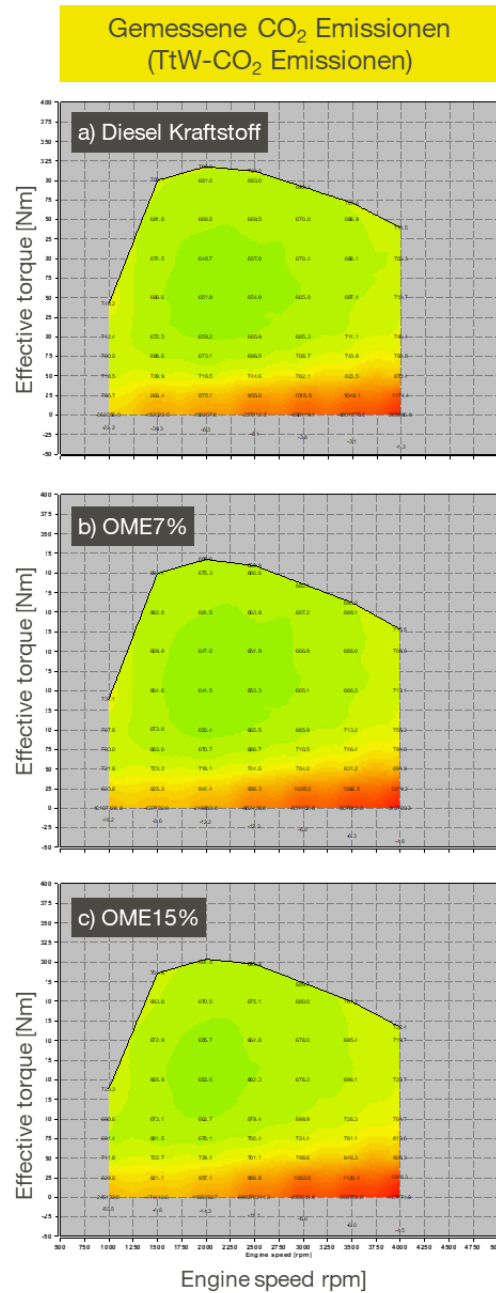


Abbildung 12: Gemessene CO₂ Emissionen (TtW-CO₂ Emissionen) für den Verbrennungsmodus „Double_EGR“ bei T_{Kühlwasser} = 90°C für Diesel, OME7% und OME15%

Die für die Einhaltung der NO_x Grenzwerte erforderliche Kalibrationsanpassung wurde bei Vitesco Technologies in Regensburg durchgeführt. Es wurden verschiedene Kalibrationsgrößen des Kraftstoffpades und des Luftpades angepasst:



1. Kraftstoffpfad:

- a. Aufgrund des Unterschiedes im Heizwert des OMEs wurde die Kraftstoffmenge für eine Drehmomentanforderung soweit erhöht, dass analog zur Serienkalibration mit Diesel, bei gegebenen Drehmoment-Set-Point, gleiches effektives Drehmoment erzeugt wird. Hier musste allerdings die Kraftstoffmenge überproportional zum Heizwertverhältnis der beiden betrachteten Kraftstoffe erhöht werden. Im Detail wurden die Einspritzmassen der Haupteinspritzung und der Nacheinspritzung erhöht. Die Piloteinspritzmassen wurden nicht erhöht, da das Verbrenungsgeräusch, siehe Abbildung 11, bereits sehr ähnlich zur Dieselerbrennung ist. Ein Anpassen der Piloteinspritzung an das Rußemissionsverhalten war nicht notwendig. Des Weiteren sind die Abstände zwischen den Pilot-, Haupt- und Nacheinspritzungen nicht verändert worden.
- b. Die Einspritzlage während des Verbrennungstakts wurde ebenfalls so nach spät verschoben, dass der Verbrennungsschwerpunkt wieder gleich mit der Serienkalibration und Dieselkraftstoff lag. Hierzu wurde das jeweilige Gesamtpaket bestehend aus Pilot-, Haupt- und Nacheinspritzungen verschoben, ohne die Abstände zwischen den einzelnen Einspritzungen zu verändern. Diese Verschiebung wirkt grundsätzlich auf die NO_x Emissionen, da diese von der Verbrennungstemperatur abhängen und diese wiederum von der Verbrennungslage im Verbrennungstakt beeinflusst wird.

2. Luftpfad:

- a. Nach den Anpassungen des Kraftstoffpfades wurde die AGR Rate für OME15% erhöht, um die in Abbildung 9 und Abbildung 10 gezeigte NO_x Erhöhung letztlich final zu kompensieren

Die genannten Anpassungen wurden für sämtliche im Steuergerät vorliegende Verbrennungsmodi (inkl. des Modus der LNT-Reinigung) und für sämtliche Kühlwassertemperaturen gleich angepasst, damit diese auch in der Aufwärmphase des Motors, die insbesondere für den WLTP Zyklus relevant ist greifen. Andere Kalibrationsgrößen wurden nicht verändert.

2.1.3.2 Dynamische Testzyklen (WLTC und RDE)

Im Anschluss an die stationäre Kennfeldvermessung wurden die Zyklen WLTC und RDE mit den drei Kraftstoffen Diesel, OME7% und OME15% gefahren. In den folgenden Abschnitten werden diese Ergebnisse erläutert. Es wird wiederum auf diese Schadstoffemissionen eingegangen:

- NO_x Emissionen
- Partikelemissionen
- CO₂ Emissionen

- Andere Schadstoffemissionen (HC, CO, CH₄, NH₃)

Alle Kraftstoffe wurde zunächst mit dem Dieselerien Datensatz gefahren. Zusätzlich wurde OME15% mit dem am Motorprüfstand entwickelten, angepassten Datensatz gefahren, der im letzten Unterkapitel näher beschrieben wurde.

2.1.3.2.1 NO_x Emissionen:

Die Abbildung 13 zeigt die NO_x Emissionen am Motoraustritt (vor Abgasnachbehandlungsanlage) für die im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Kraftstoff – Datensatz Kombinationen. Man sieht deutlich die bereits bei der stationären Kennfeldvermessung erkannte Erhöhung der NO_x Emissionen bei der Verwendung des Dieselerien Datensatzes. Bei OME7% betragen diese ca. 30 % und bei OME15% ca. 60 % mehr als für Dieselkraftstoff. Der Effekt der Datensatzanpassung ist ebenfalls deutlich zu erkennen (rechter Balken in Abbildung 13). Das Ziel die NO_x Emissionen für OME15% am Motoraustritt gleich zu den mit Dieselkraftstoff zu bekommen, ist vollumfänglich gelungen.

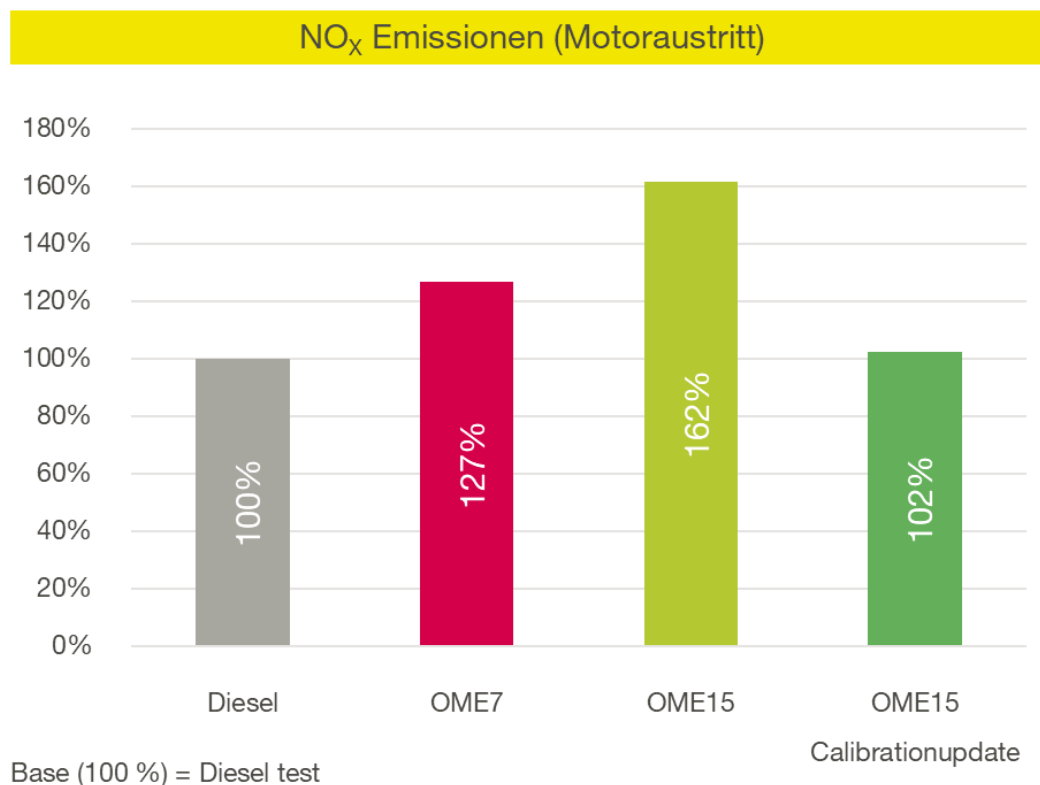


Abbildung 13: NO_x Emissionen für WLTC Test am Motorprüfstand für die Kraftstoffe Diesel, OME7% und OME15%, alle mit Seriendatensatz gefahren, OME15% noch zusätzlich mit angepasstem Datensatz; Messung am Motorausritt

Für die gleichen Tests zeigt die Abbildung 14 die NO_x Emissionen nach dem Abgasnachbehandlungssystem, also an der Position „Tail Pipe“. Wiederum ist ein Anstieg der NO_x Emissionen von Diesel über OME7% zu OME15% zu erkennen. Die NO_x Emissionen für OME15% mit angepasster Kalibration sind hier ca. 10% besser, als die Messung mit OME7% Kraftstoff und Dieselerisendatensatz. Beide liegen zwar in ihren Absolutwerten höher als für Dieselmotorkraftstoff, aber dennoch deutlich unter dem EU6 Grenzwert (gestrichelte Linie in Abbildung 14). Die NO_x Emissionen für OME15% mit Dieselerisendatensatz führt hier zu deutlich höheren Werten, die nicht mehr innerhalb des EU6 Grenzwertes liegen. Es ist klar zu erkennen, dass OME15% Kraftstoff nicht ohne Kalibrationsanpassung gefahren werden kann.

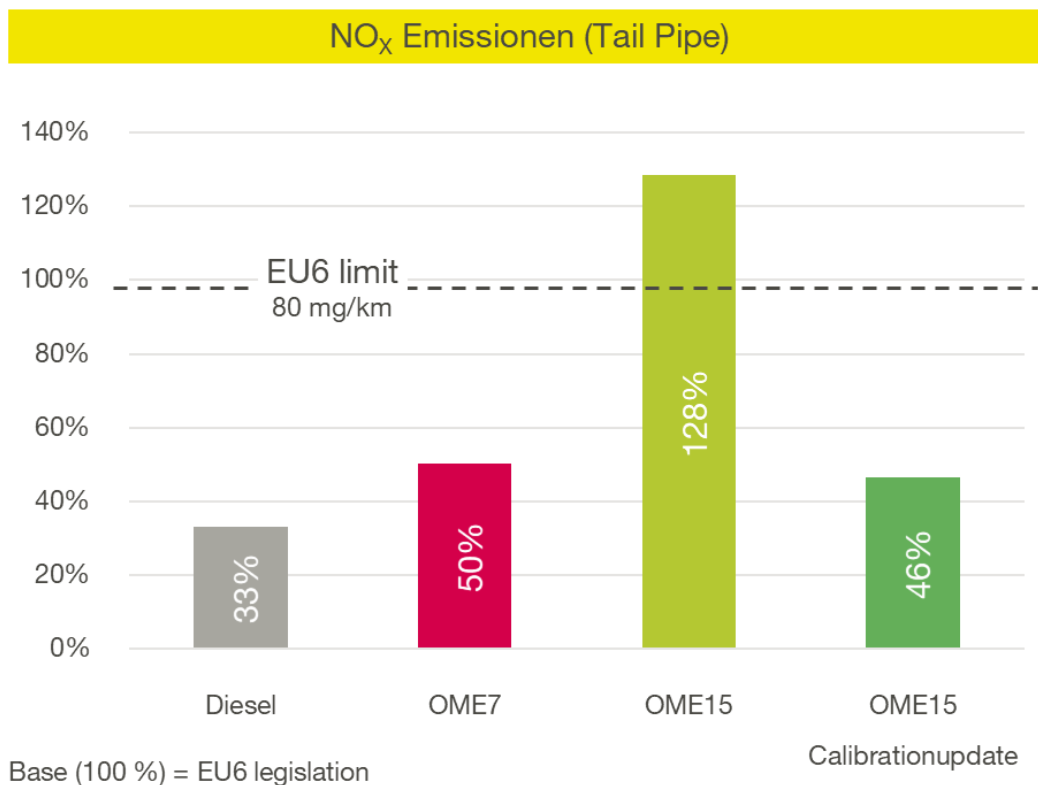


Abbildung 14: NO_x Emissionen für WLTC Test am Motorprüfstand für die Kraftstoffe Diesel, OME7% und OME15%, alle mit Serisendatensatz gefahren, OME15% noch zusätzlich mit angepasstem Datensatz; Messung nach Abgasnachbehandlung an Position „Tail Pipe“

In den gefahrenen WLTP Zyklen zeigt sich am Motorausstritt ein starker Effekt des Kraftstoffs auf die NO_x Emissionen, Abbildung 13. Betrachtet man dahingegen die NO_x Emissionen nach dem Abgasnachbehandlungssystem („Tail Pipe“), erkennt man einen größeren relativen Effekt des Kraftstoffs, Abbildung 14. Bei OME7% ergibt sich am Motorausstritt im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff eine relative Erhöhung von 27 %, an der Position „Tail Pipe“ ergeben sich allerdings ca. 50 % (gebildet aus dem Verhältnis der in Abbildung 14 gezeigten Werte: 50 % / 33 % = 1.51 → ca. 50%

Erhöhung). Für OME15% ergeben sich hier am Motorausstritt 62 % und an der Position Tail Pipe ca. 380 %.

Der Unterschied wird bei einer Detailbetrachtung der zeitlich aufgelösten NO_x Emissionen an verschiedenen Positionen im Abgasstrang ersichtlich. Hier wird dies nun für den Unterschied der NO_x Emissionen von OME7% zu Dieselkraftstoff verdeutlicht.

In der Abbildung 15 erkennt man, dass im ersten Teil des WLTPs die NO_x Emissionen zwischen OME7% und Dieselkraftstoff an der Position „Tail Pipe“ sehr ähnlich sind. Im Bereich t = 800 s steigen die NO_x Emissionen zunächst für Diesel aufgrund einer ersten LNT Regeneration leicht an. Für OME7% steigen die NO_x Emissionen dann allerdings kurze Zeit später, t = 900 – 1200 s, stark an, hier wird ebenfalls eine LNT Regeneration durchgeführt. Der Anstieg ist bei OME7% deutlich stärker als bei Dieselkraftstoff.

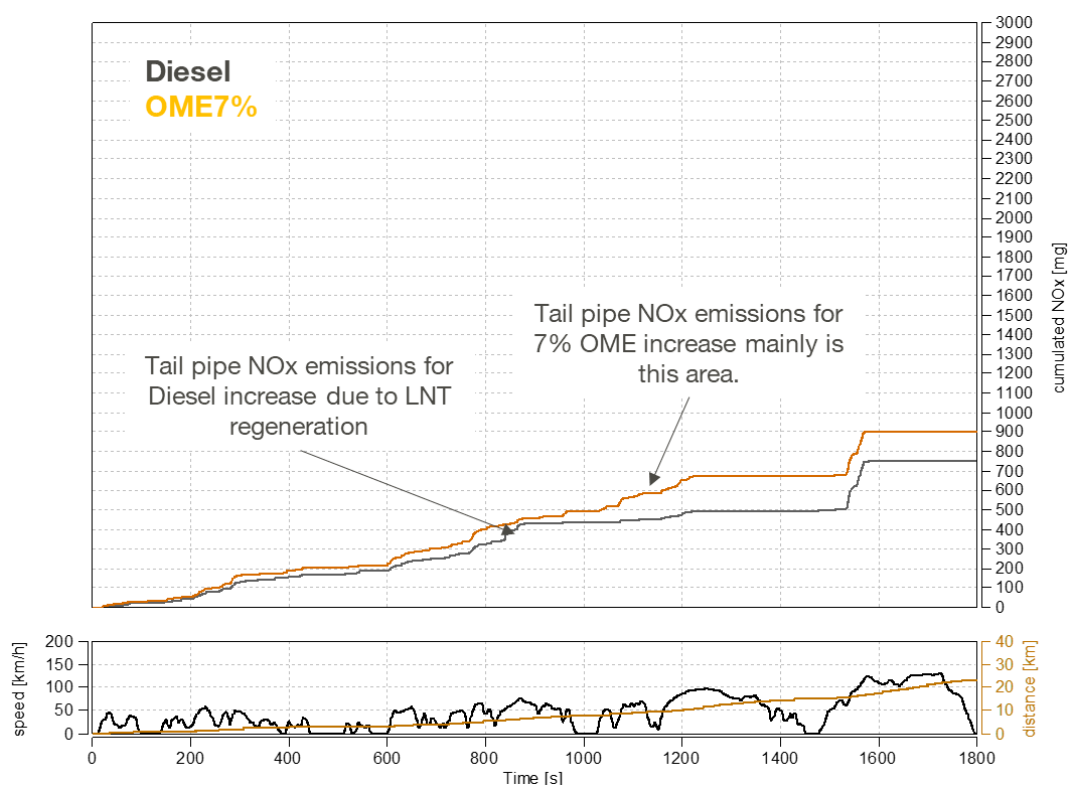


Abbildung 15: Akkumulierte NO_x Emissionen von OME7% und Dieselkraftstoff im WLTP and der Position „Tail Pipe“

Eine Erklärung hierfür findet sich in Abbildung 16. Im oberen Teil sind die NO_x Emissionen am Motorausstritt dargestellt. Diese sind für beide Kraftstoffe nahezu identisch. In der Mitte sind die NO_x Emissionen nach LNT oder vor SCR gezeigt. Details zum Aufbau können der Abbildung 2 entnommen werden. Hier ist bis ca. t = 975 s bereits eine leichte Erhöhung der NO_x Emissionen bei OME7% zu erkennen, da die LNT

Regeneration noch nicht stattgefunden hat, der LNT somit voll ist und mehr NO_x Emissionen durchlässt.

Aufgrund der geringeren Abgastemperatur für OME7%, siehe auch das Ergebnis der stationären Kennfeldvermessung in Abbildung 11, ist der Wirkungsgrad des SCR Systems für OME7% geringer, als für Dieseldkraftstoff. Dies erkennt man im unteren Teil der Abbildung 16. Die NO_x Emissionen steigen dann nochmals für OME7% bei t = 1040 – 1125 s an (Markierung 3 in Abbildung 16), weil hier erstens nun die LNT Regeneration stattfindet und den „üblichen“ aber sehr stark ausgebildeten NO_x Peak erzeugt, dieser aber zweitens nicht im SCR System konvertiert wird, weil wiederum die Abgastemperatur und damit die SCR Systemtemperatur zu niedrig ist.

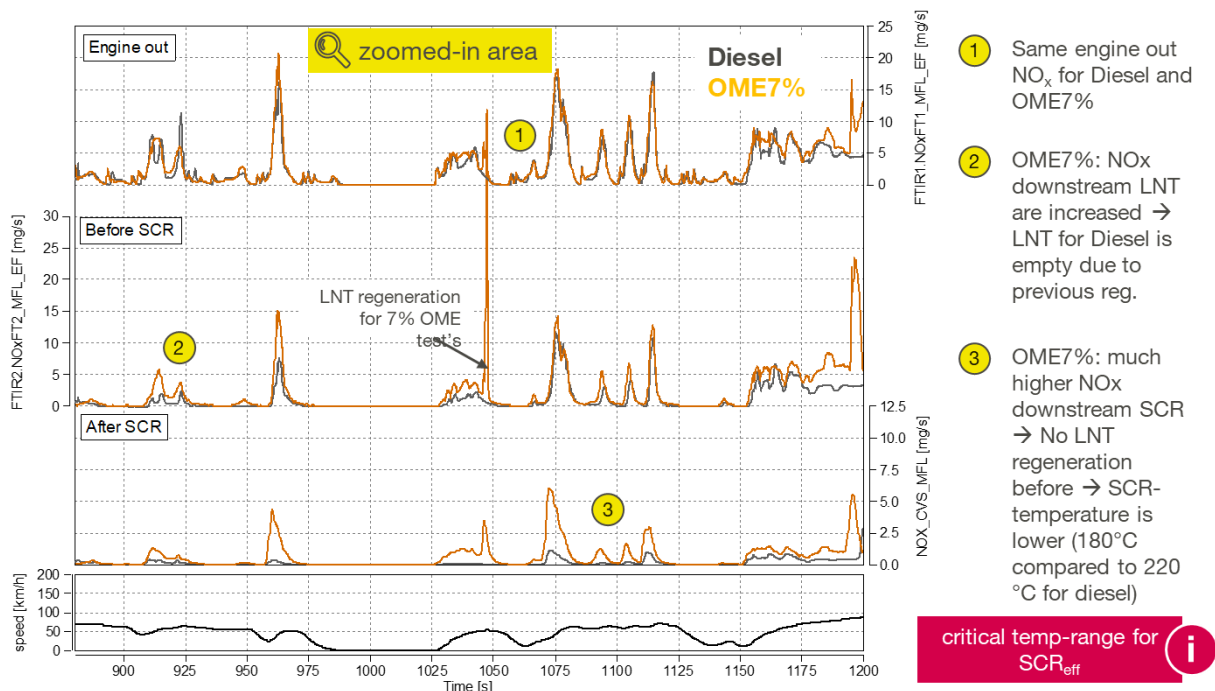


Abbildung 16: Detailbetrachtungen der NO_x Emissionen für OME7% und Dieseldkraftstoff

Die Temperaturen vor LNT und vor SCR System sind in Abbildung 17 dargestellt. Deutlich ist hier die Erhöhung der Abgastemperatur für Diesel vor LNT zu erkennen. Dieser Anstieg beruht erstens auf der zuvor bereits beschriebenen grundsätzlich höheren Abgastemperatur für Diesel und zweitens auf der Erhöhung der Temperatur durch die LNT Regeneration. Zeitlich etwas versetzt steigt auch die Temperatur vor SCR System an. Dieser Anstieg ist nur sehr wichtig, weil er dafür sorgt, dass die SCR System Temperatur für Diesel über 180 °C liegt. Oberhalb dieser Temperatur ist die Konvertierungsrate für NO_x Emissionen im SCR System deutlich höher als darunter.

Diese Erhöhung der Konvertierungsrate führt dann zu den geringeren NO_x Emissionen an der Position „Tail Pipe“ für Diesel.

Zusammenfassend kann man nun feststellen, dass OME7% mit der Dieselkalibration zu einer leichter Erhöhung der innermotorischen NO_x Emissionen führt. Aber, im Zusammenspiel mit der für dieses Fahrzeug spezifischen Abgasnachbehandlungsanlage für NO_x Emissionen (LNT und SCR System), steigt der relative Unterschied der NO_x Emissionen an der Position „Tail Pipe“ stärker, da die Serienabstimmung dieser Anlage für Dieselkraftstoff erfolgte und mit dem Wechsel zu OME7% diese Abstimmung nicht mehr optimal ist. Dennoch sind die NO_x-Emissionen an der Position „Tail Pipe“ noch deutlich unter dem spezifizierten EU6 Limit, womit ein Betrieb des Fahrzeugs mit OME7% nicht in Frage zu stellen ist.

Für OME15% gilt prinzipiell der gleiche Sachverhalt in deutlich stärkerer Ausprägung. Da die NO_x Emissionen an der Position „Tail Pipe“ aber über dem erlaubten Grenzwert liegen, ist für diesen Kraftstoff, OME15%, eine Anpassung der Kalibration notwendig. Das Ergebnis dieser Kalibrationsverbesserung wurde bereits in Abbildung 14 diskutiert.

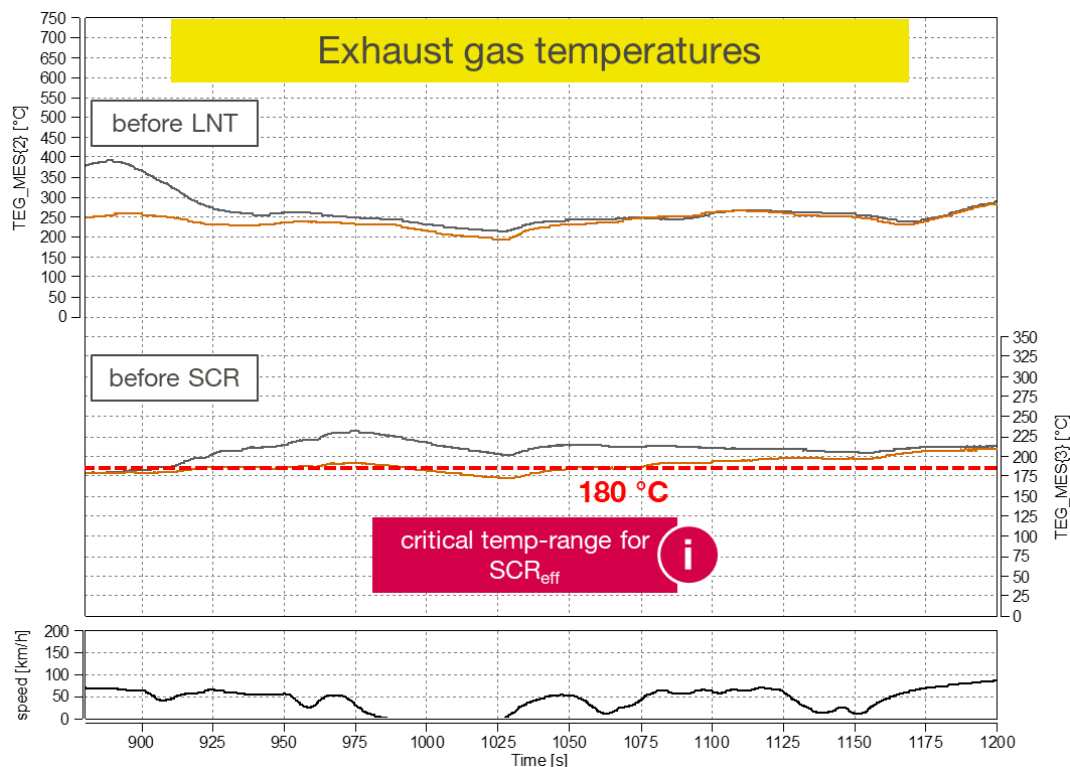


Abbildung 17: Abgastemperaturen vor LNT und vor SCR System für OME7% und Dieselkraftstoff im WLTP

2.1.3.2.2 Partikelemissionen:

Die PM (Particulate Matter = Rußmasseemissionen) in Abbildung 18 verhalten sich analog den Ergebnissen der stationären Kennfeldvermessung, siehe hierzu Abbildung 9 und Abbildung 10. Als Ursache kann hier wiederum der Sauerstoffanteil im OME Molekül gesehen werden, der dazu führt, dass bei der Oxidation / Verbrennung des Kraftstoffs lokal ausreichend Sauerstoff vorliegt. Mit steigendem OME Anteil im

Dieselmotoren sinken daher die PM Emissionen. Mit angepasstem Datensatz und OME15% Kraftstoff wird der Trend wieder zum Teil kompensiert, da die dort erhöhte AGR Rate grundsätzlich zu einem Anstieg der PM Emissionen führt. Letztlich ergibt sich für OME15% mit Kalibrationsanpassung das Rußemissionsniveau des OME7% Kraftstoffs mit Dieselerien Datensatz.

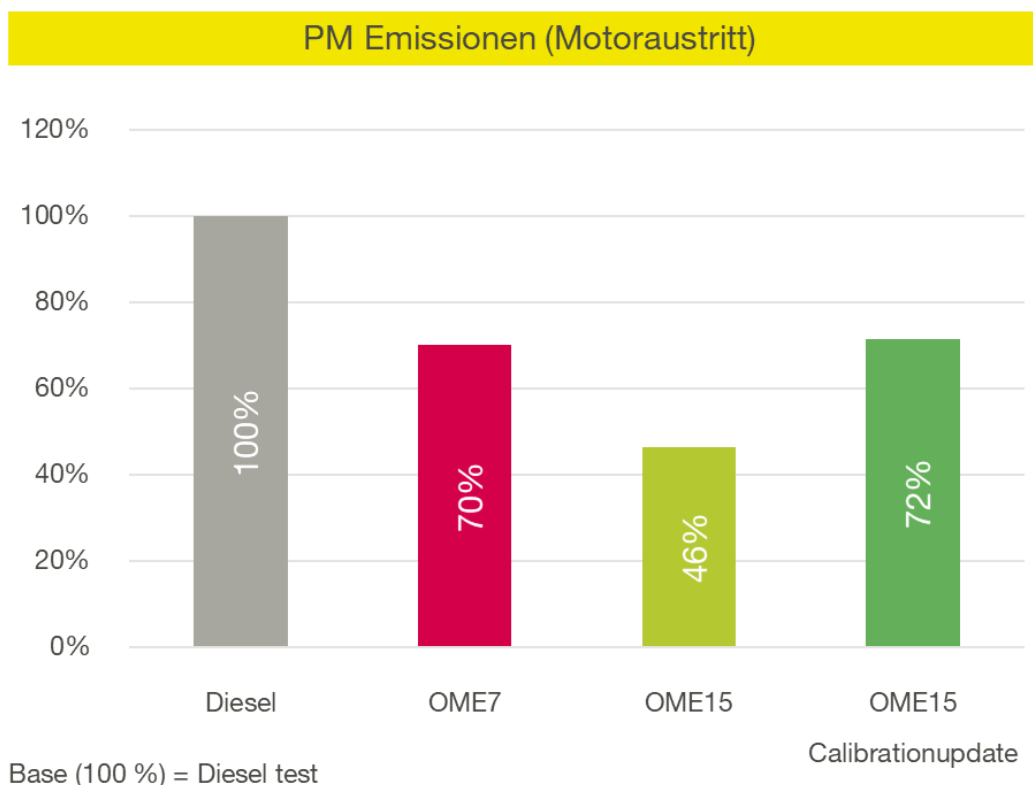


Abbildung 18 PM Emissionen für WLTC Test am Motorprüfstand für die Kraftstoffe Diesel, OME7% und OME15%, alle mit Seriensatz gefahren, OME15% noch zusätzlich mit angepasstem Datensatz; Messung am Motoraustritt

2.1.3.2.3 CO₂ Emissionen:

Die CO₂ Emissionen der vermessenen Kraftstoff-Datensatz Kombinationen sind in Abbildung 19 dargestellt. Das Diagramm zeigt die am Motorprüfstand gemessenen CO₂ Emissionen und die unter der Annahme einer nachhaltigen Erzeugung des OMEs berechneten CO₂ Emission. Erstere wird in der Regel als Tank-to-Wheel (TtW) und letztere, die den CO₂ Abdruck des Kraftstoffs mitberücksichtigt, als Well-to-Wheel (WtW) bezeichnet.

Die TtW-CO₂ Emissionen verhalten sich analog zu dem bereits für Abbildung 12 diskutierten Zusammenhang. Der Einfluss des OMEs im OME15% auf den CO₂ Anstieg bei gleichem Verbrennungswirkungsgrad beträgt rechnerisch ca. 1.6%. Dieser Anstieg wurde für beide OME15% Messungen erreicht. Für OME15% ohne Kalibrationsanpassung ergab sich ein Anstieg von 1.5 % und für OME15% mit

Kalibrationsanpassung ein Anstieg von 1.6 %. Hier kann im Umkehrschluss gefolgert werden, dass damit der Verbrennungswirkungsgrad der OME15% identisch ist zu der Messung mit Dieseldieselkraftstoff.

Die WtW-CO₂ Emissionen basieren auf den TtW-CO₂ Emissionen inklusiv der rein rechnerischen Reduktion der CO₂ Emissionen aufgrund des nachhaltig produzierten OMEs und zeigen klar den deutlichen Effekt auf die CO₂ Emissionen. Für OME7% und OME15% werden ein Rückgang von ca. 7% respektive, 14 % erzielt.

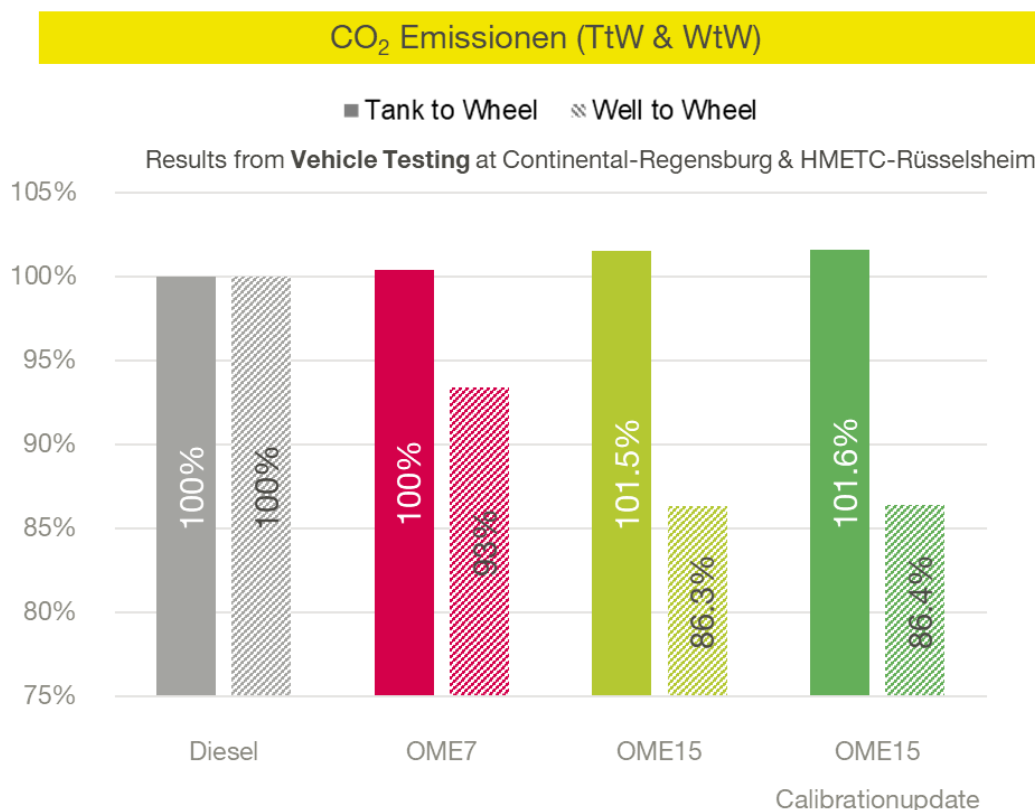


Abbildung 19: CO₂ Emissionen (TtW und WtW) für WLTC Test am Motorprüfstand für die Kraftstoffe Diesel, OME7% und OME15%, alle mit Serientatensatz gefahren, OME15% noch zusätzlich mit angepasstem Datensatz; Messung am Motorausstritt

2.1.3.2.4 Andere Schadstoffemissionen:

Die Emissionen anderer Schadstoffe sind in der Abbildung 20 dargestellt. Die HC, CO und CH₄ Emissionen wurden an der Position Motorausstritt und die NH₃ Emissionen an der Position „Tail Pipe“ gemessen. Die drei zuerst genannten Schadstoffe sind bei sämtlichen OME-Diesel-Blendmessungen niedriger als bei der Dieselmessung und damit unkritisch.

Die NH₃ Emissionen wurden an der Position Tail Pipe bestimmt, da NH₃ Emissionen im Wesentlichen durch eine nicht optimal angepasste Abgasnachbehandlungsanlage

(SCR) entstehen. Da die Kalibration der Adblue-Dosierung und auch die Betriebsstrategie der SCR-Anlage nicht an die OME-Blendkraftstoff angepasst wurden, ergeben sich für diese Kraftstoffe leicht erhöhte NH₃ Emissionen. Allerdings ist das absolute Niveau sehr niedrig, sämtliche Werte liegen unter 0.15 mg/km.



Abbildung 20: HC, CO, CH₄ und NH₃ Emissionen für WLTC Test am Motorprüfstand für die Kraftstoffe Diesel, OME7% und OME15%, alle mit Seriensatz gefahren, OME15% noch zusätzlich mit angepasstem Datensatz; Messung am Motorausstritt

Die Untersuchungen im RDE Zyklus am Motorprüfstand ergab prinzipiell ähnliche Ergebnisse wie die auf den letzten Seiten gezeigten Ergebnisse im WLTC Zyklus. Daher wird hier auf eine Detaildarstellung verzichtet.

2.1.3.3 Vorbereitung des Versuchsmotors für Untersuchungen mit OME100%

Der Versuchsmotor, der für die in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten OME-Diesel Blenduntersuchungen verwendet wurde (Bereitstellung durch Arbeitspartner HMETC), ist für die Nutzung von OME100% vorbereitet worden. Um eine reibungslose Funktionsweise des Motors und hier insbesondere des Niederdrucksystems zu garantieren, wurden folgende Änderungen am Motor und an der Kraftstoffversorgung für den Prüfstand vorgenommen:

Vorbereitungsarbeiten am Motor (Abbildung 21):

- Austausch der Niederdruckleitungen zur Hochdruckpumpe durch Teflonleitungen für den Betrieb mit OME100%
- Austausch der Injektor-Rückführleitungen durch Teflonleitungen für den Betrieb mit OME100%

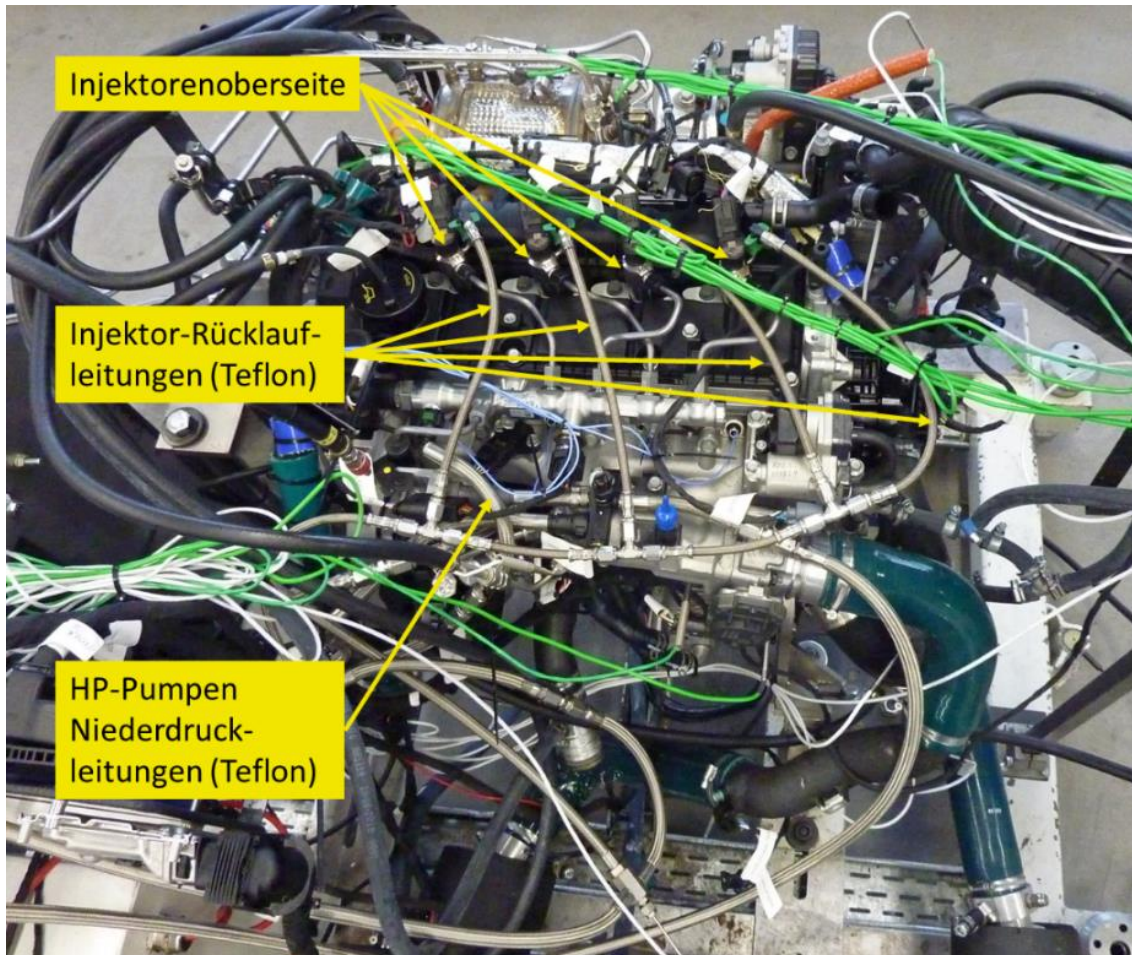


Abbildung 21: Versuchsmotors mit ausgetauschten und OME100% resistenten Leitungen für Injektoren und HP-Pumpe

Vorbereitungsmaßnahmen an der Kraftstoffversorgung des Prüfstands für den Motor (Abbildung 22):

- Kraftstoffversorgung von kontinuierlichem Tankbetrieb auf Fassbetrieb umgestellt
- Mischeinheit für schnellen Wechsel von OME100% auf Dieselkraftstoff
- Kraftstoffzuführungsleitungen aus Teflon für den Betrieb mit OME100%
- Auswahl geeigneter Vorförderpumpe für den Betrieb mit OME100%

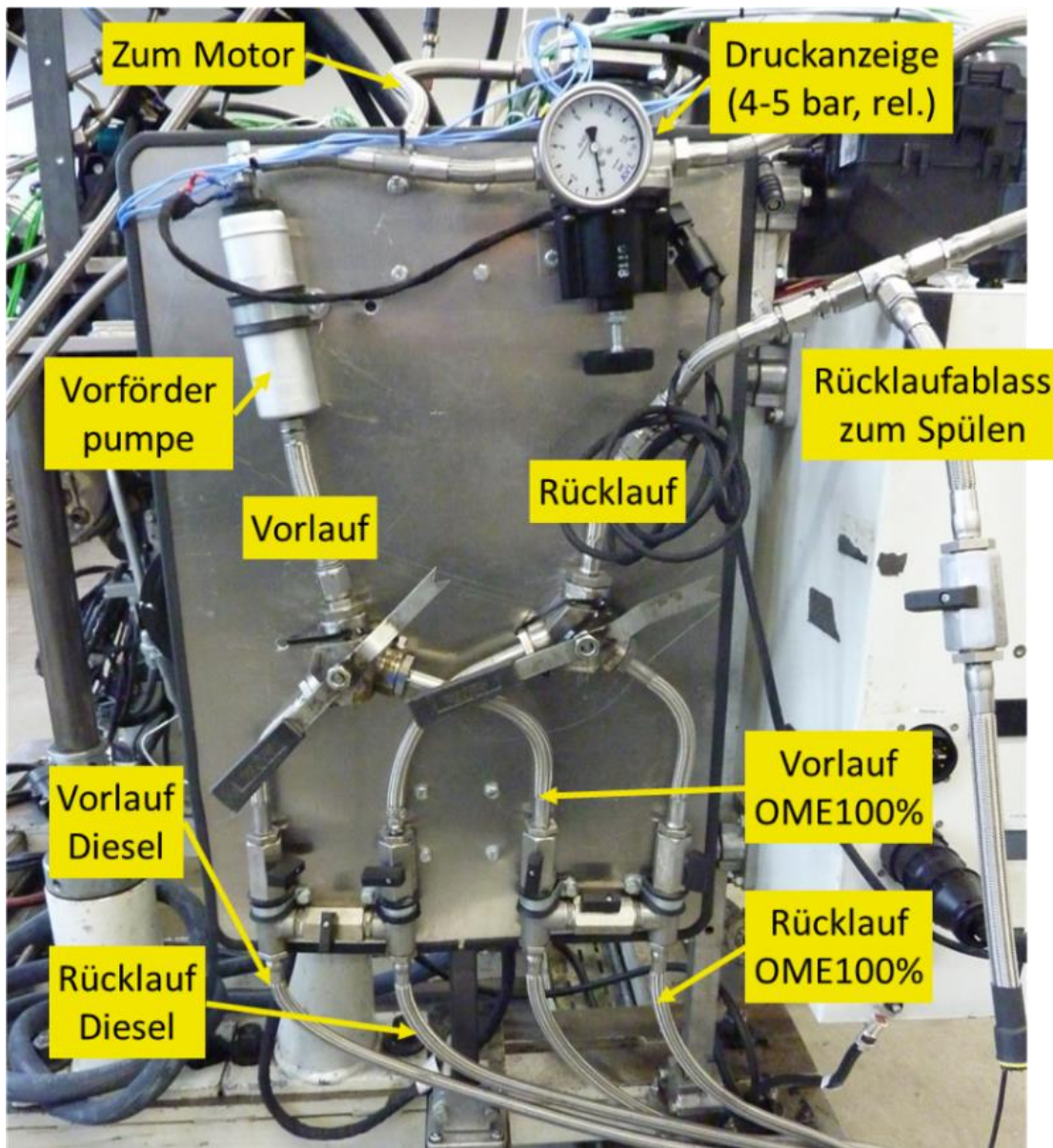


Abbildung 22: Übersicht der Mischeinheit für die Kraftstoffzuführung zum Versuchsmotor

Neben den hier aufgelisteten Vorbereitungsmaßnahmen wurden noch verschiedene Ersatzteile von Vitesco Technologies für den Betrieb des Motors bereitgestellt. Diese umfassen Ersatzteile für

- das Einspritzsystem,
- den Motor und
- das Abgasnachbehandlungssystem.
- Niederdrucksystem für Demofahrzeug

Zudem wurden vier Druckquarze für die Zylinderdruckerfassung zur Verfügung gestellt. Diese sind bereits im Motor montiert.



2.1.4 Arbeitspaket C6.1.4 Demofahrzeug

Parallel zu den Messungen am Motorprüfstand, Kapitel 2.1.3, wurden Untersuchungen mit dem Demofahrzeug durchgeführt. Das Fahrzeug wurde vom Projektpartner HMETC bereitgestellt, ist mit einem baugleichen Motor wie für den Vollmotoruntersuchungen ausgestattet und wurde von Vitesco Technologies mit entsprechender, umfangreicher Messtechnik ausgerüstet.

Zunächst wurden Vortests durchgeführt, um eine prinzipielle Eignung der Fahrzeughardware für die Nutzung von OME-Diesel Blendkraftstoffen zu überprüfen. Diese werden im folgenden Kapitel erläutert. Danach werden die eigentlichen Messungen mit Dieselkraftstoff und verschiedenen OME-Diesel Blends in verschiedenen Zyklen präsentiert.

2.1.4.1 Vortests am Fahrzeug für OME-Diesel Blenduntersuchungen

Wie bereits zuvor erläutert, sollen OME-Diesel Blend Untersuchungen sowohl am Motorprüfstand als auch am Demofahrzeug mit der dieselidentischen Hardware durchgeführt werden.

Für die im nächsten Unterkapitel präsentierten Untersuchungen mit den OME-Diesel Blends musste sichergestellt sein, dass das Fahrzeug und hier insbesondere das Kraftstoffniederdrucksystem inklusiv Tankmodul geeignet sind mit diesen Kraftstoffen betrieben zu werden. Hierfür wurden an einem baugleichen Fahrzeug Untersuchungen mit OME25% durchgeführt. Der Anteil von OME wurde hier erhöht, um sicherzustellen, dass die später zu untersuchenden OME-Anteile in Diesel auch sicher mit abgedeckt sind.

Das Fahrzeug wurde mit dem OME25% Kraftstoff betankt. Danach wurde über eine entsprechende Modifikation der Motorsteuergerätes die Vorförderpumpe so angesteuert, dass ein permanenter Kraftstoffdurchfluss entstand. Da der Motor für diese Vortests nicht betrieben wurde, wurde über eine Verbindung der Verschlauchung von der Position „Vorlauf Hochdruckpumpe“ zur Position „Rücklauf Hochdruckpumpe“ das Rückströmen des Kraftstoffs in den Tank ermöglicht. Der Druck wurde auf 4 bar festgesetzt bei einer Temperatur von 40 °C. Der Aufbau ist in Abbildung 23 gezeigt.

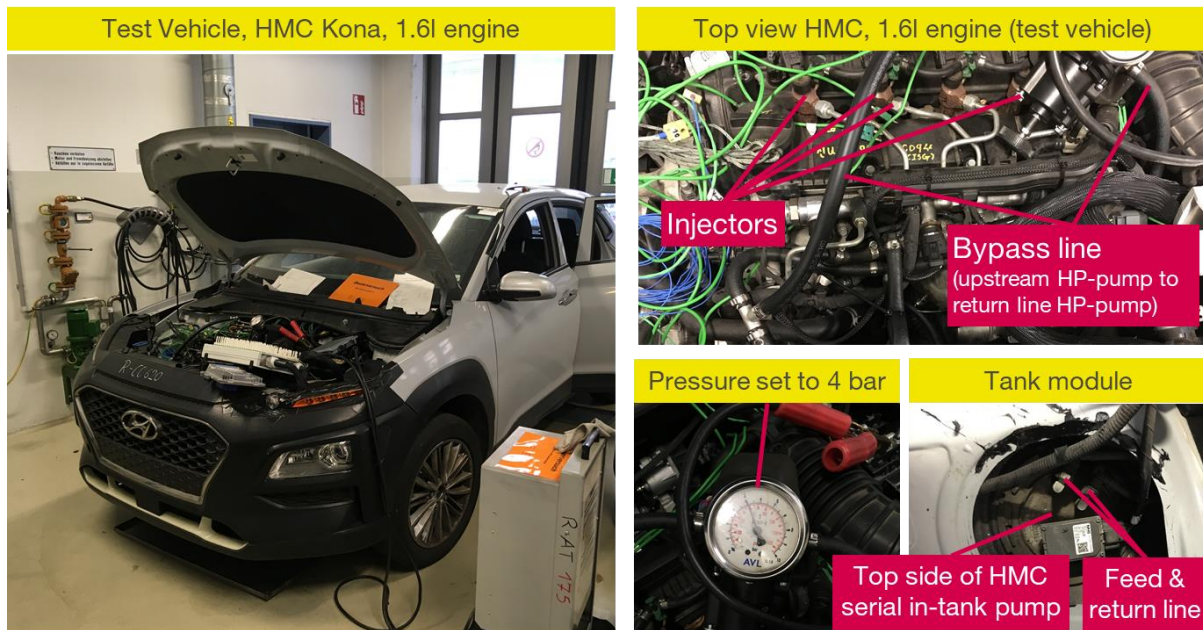


Abbildung 23: Vortests für Sicherstellung der prinzipiellen Eignung der Fahrzeughardware für Untersuchungen mit OME-Diesel Blends

Dieser Vortest wurde 21 Tage betrieben. Nach dieser Zeit konnte keine Auffälligkeit in der Funktionsweise der Vorförderpumpe oder an den Verschlauchungen festgestellt werden.

Damit wurde eine prinzipielle Eignung der Fahrzeughardware für die Untersuchungen mit OME-Diesel Blends gezeigt.

2.1.4.2 WLTC und RDE Zyklen

Um die finale Performance der OME-Diesel Blends im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoff aufzuzeigen, wurden im Demofahrzeug zunächst Basismessungen mit Dieselmotorkraftstoff durchgeführt. Im Anschluss erfolgte dann die Vermessung der beiden OME-Diesel Blends, OME7% und OME15%, im den Zyklen WLTP und RDE.

Die RDE Tests wurden wegen der höheren Reproduzierbarkeit auf einem dynamischen Fahrzeugprüfständen bei Vitesco Technologies in Regensburg und nicht auf öffentlichen Straßen gefahren.

Im Anschluss an die Dieselmotorkraftstoffmessungen wurden Messungen mit OME7% und OME15% Kraftstoff gefahren.

Die Tests wurden sowohl bei dem Projektpartner Vitesco Technologies in Regensburg als auch bei dem Projektpartner HMETC in Rüsselsheim gefahren. Die Tabelle 5 zeigt die Randbedingungen der Abgasnachbehandlungsanlage der realisierten Tests und die Kraftstoff – Kalibrationskombinationen, die gefahren wurden.

Die Emissionen wurden mit den in den verschiedenen Häusern vorhandener Messtechnik gemessen. Bei Vitesco Technologies waren dies zwei FTIR Messanlagen,

eine an der Position „Engine Out“ und eine an der Position „after LNT“ sowie eine AMA Messanlage an der Position „Tail Pipe“.

Test	Verantwortliche Partner / Ort des Tests	LNT Zustand	SCR Zustand	Diesel	OME7%	OME15%	OME15% + Kalibrationsanpassung
WLTP	Vitesco Technologies GmbH / Regensburg	Aktiv	Aktiv	X	X	X	X
WLTP	HMTEC / Rüsselsheim	Aktiv	Aktiv	X	X		X
RDE	Vitesco Technologies GmbH / Regensburg	Deaktiv	Aktiv	X	X	X	
RDE	HMETC / Rüsselsheim	Aktiv	Aktiv	X	X		X

Tabelle 5: Übersicht der Demofahrzeugtests mit Diesel, OME7% und OME15%

Die Abbildung 24 zeigt das finale Ergebnis der OME-Diesel-Blenduntersuchung bezüglich der NO_x und PM (Ruß) Schadstoffemissionen. Aus der Teilabbildung a) wird deutlich, dass mit beiden untersuchten Blendkraftstoffen (OME7% und OME15%) das Projektziel erreicht wurde. Sowohl im WLTC Zyklus, als auch im RDE Zyklus liegen die NO_x Emissionen weit unter der gesetzlichen Limitierung. Positiv auffällig sind hier im RDE Zyklus die geringeren NO_x Emissionen für beide OME-Diesel Blends im Vergleich zum Serienkraftstoff Diesel. Wichtig ist hier zu erwähnen, dass die OME15% Tests mit einer angepassten Motorkalibration gefahren wurden. Detail hierzu finden sich im Kapitel 2.1.3.2.

Die Rußemissionen konnten für beide OME-Dieselblends ebenfalls im Vergleich zum Dieselmessung deutlich gesenkt werden. Das Reduktionspotential im Vergleich zur Dieselmessung liegt hier bei ca. 20% für OME7% und ca. 40% für OME15% (mit Kalibrationsanpassung). Somit zeigt sich, dass der im OME Kraftstoff chemisch gebundene Sauerstoff die Rußbildung überproportional beeinflusst. Dies wird sich für noch höhere Blendraten fortsetzen und könnte dann auch zur Auslegung kleinerer Partikelfilter führen, was wiederum zu Kosten- und Kraftstoffeinsparung führen könnte. Da im aktuellen Projekt aber nur Blendkraftstoffe untersucht wurden, die keine Hardwareänderungen bedingen, wurde die Anpassung des Partikelfilters nicht weiterverfolgt.

Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

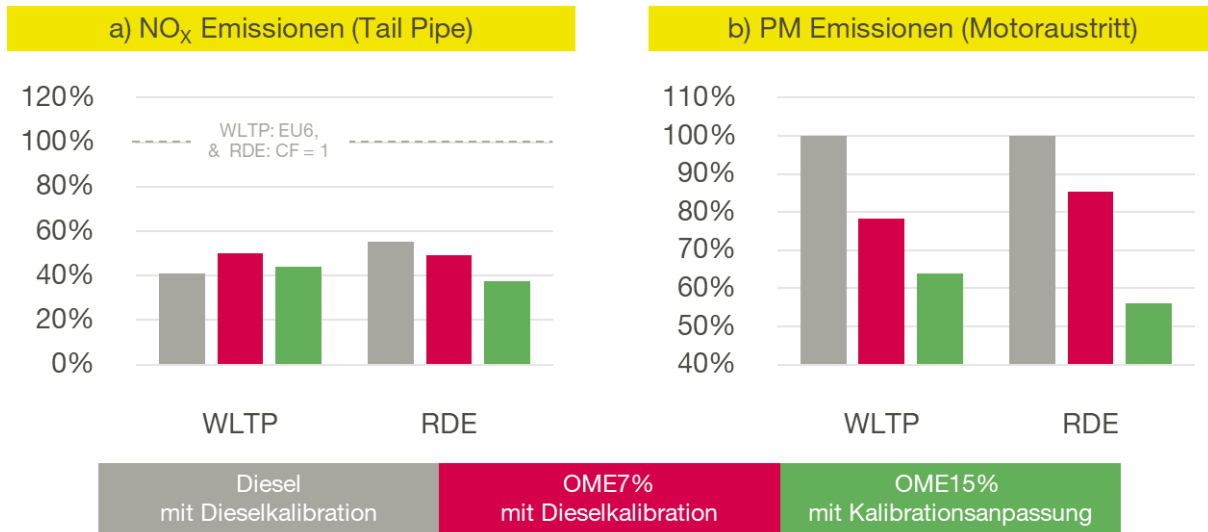


Abbildung 24: a) NO_x und b) PM Emissionen für verschiedene Kraftstoff-Kalibrationskombinationen für WLTC und RDE Zyklen

Neben den Schadstoffemissionen wurde ein ähnlich positiver Trend bei den CO₂ Emissionen gemessen, Abbildung 25. Die TtW-CO₂ Emissionen sind für die OME-Diesel-Blends in beiden vermessenen Zyklen (WLTC und RDE) gleich oder geringer, als für die Dieselmessung. Dies ist insofern erstaunlich, als am Motorprüfstand eine leichte Erhöhung der TtW-CO₂ Emissionen festgestellt wurde, siehe Abbildung 19.

Durch die bereits geringeren TtW-CO₂ Emissionswerte, ergeben sich dann nochmals geringere WtW-CO₂ Emissionen. Die WtW-CO₂ Einsparung für OME7% ergibt sich zu 6-10 % (abhängig vom Zyklus), die für OME15% mit Kalibrationsanpassung zu 17 % für beide Zyklen WLTP und RDE. Diese sind, wie bereits oben beschrieben, unter der Annahme berechnet, dass das im Blend befindliche OME nachhaltig hergestellt wurde.

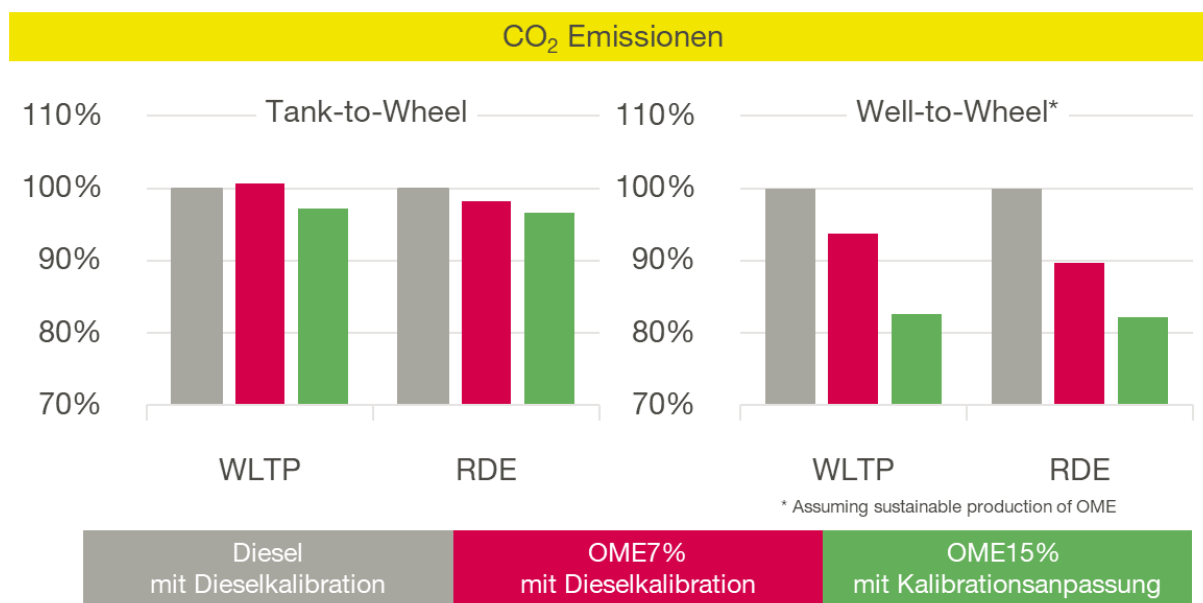


Abbildung 25: CO₂ Emissionen für verschiedene Kraftstoff-Kalibrationskombinationen für WLTC und RDE Zyklen

2.1.4.3 Zusammenfassung der Demofahrzeugergebnisse

Prinzipiell stellt eine Zumischung von 7 % OME in Dieselkraftstoff die Grenzmischung dar, die noch ohne Hardware und Softwareanpassung aber auch ohne Kalibrationsanpassung in einem EU6 Dieselfahrzeug verwendet werden kann. Die NO_x Emissionen sind hier auf gleichem Niveau wie bei der Verwendung von Dieselkraftstoff, bei gleichzeitiger signifikanter Verringerung der Rußemissionen von ca. 20 % und der WtW-CO₂ Emissionen von 6 – 10 %, abhängig vom betrachteten Fahrzyklus.

Eine Zumischung von 15 % OME in Dieselkraftstoff ist die Grenzmischung für gleiche Hardware und Software aber mit angepasster Motorkalibration. Ohne Modifikation dieser Kalibration, sind die NO_x Emissionen zu hoch, wie aus Abbildung 14 hervorgeht. Eine Kalibrationsanpassung führt dann wieder zu NO_x Emissionen, die wiederum auf oder unter dem Niveau für Dieselkraftstoff mit Dieselkalibration liegen. Analog zu den Ergebnissen mit OME7% ergeben sich für OME15% ebenso stark reduzierte Rußemissionen von 30 – 45 % (je nach Zyklus) und eine signifikante Reduktion der WtW-CO₂ Emissionen von ca. 17 %.

2.2 Arbeitspaket D5a: Bereitstellung der FIE Komponenten für OME Untersuchungen an PKW Motoren

Im Querschnittsarbeitspaket D5a wurden Einspritzsystemkomponenten für das Arbeitspaket C6.1 bereitgestellt. Die Abbildung 26 zeigt das Seriensystem von Vitesco Technologies, das als Basissystem für die Entwicklungsarbeiten im Arbeitspaket D5a zum Einsatz kam.

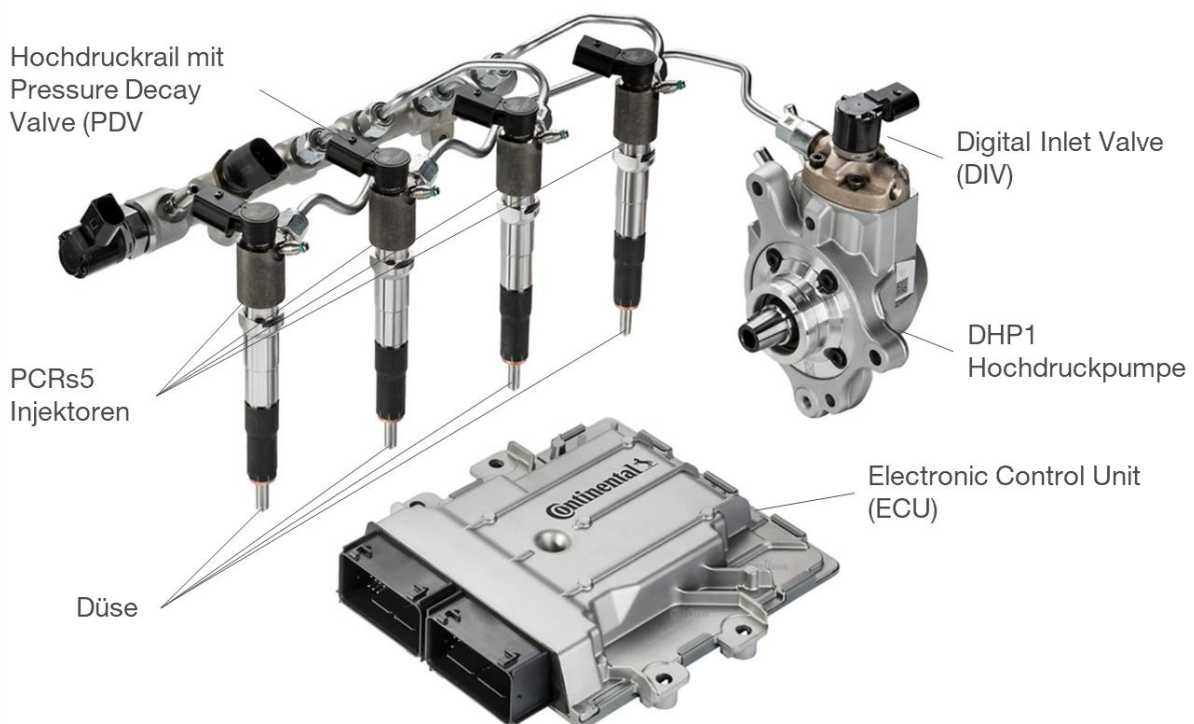


Abbildung 26: Dieseleinspritzsystem von Vitesco Technologies

Die Komponenten des Einspritzsystems kamen am Einzylindermotor (C6.1.2) zum Einsatz und wurden für einen Einsatz am Vollmotor (C6.1.3) und im Demofahrzeug (C6.1.4) zur Verfügung gestellt.

Bei den Komponenten handelt es sich um Injektoren, dedizierten Düsen für OME100%, Verschlauchungen, Motorsteuergeräte und Kalibrationsdatensätze. Die ebenfalls für OME100% anzupassende Hochdruckpumpe für C6.1.3 und C6.1.4 wurde vom Arbeitspaketpartner Vitesco Technologies Roding GmbH designt, aufgebaut und geliefert.

In den beiden nun folgenden Unterkapiteln, 2.2.1 und 0 wird auf die Auslegung und Definition der Einspritzsystemkomponenten für den Einzylindermotor und für Vollmotor und Demofahrzeug eingegangen. Da der Vollmotor und der Motor im Fahrzeug identisch sind werden diese natürlich in einem Kapitel behandelt.



2.2.1 Definition und Aufbau des FIE Systems für Einzylindermotoruntersuchungen im Arbeitspaket C6.1.2

In Absprache mit den C6.1 Arbeitspaketpartnern Vitesco Technologies Roding GmbH, HMETC und TU-Dresden wurden die verschiedenen Düsenvarianten für die Untersuchungen am Einzylindermotorprüfstand definiert. Es können hier prinzipiell wieder die beiden Kategorien OME-Blendkraftstoff und OME100% unterschieden werden.

Für die Blenduntersuchungen wurde das gesamte FIE System verwendet, das bereits für Dieselkraftstoff für den Einzylindermotor optimiert wurde. Bei der Düsenauslegung für OME100% Untersuchungen wurde darauf geachtet, dass die unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften des OMEs berücksichtigt werden, als auch die Übertragbarkeit auf den in den Arbeitspaketen C6.1.3. und C6.1.4 verwendeten Motor möglich ist. Die Tabelle 6 zeigt die zwischen den C6.1 Arbeitspaketpartnern definierten Düsenvarianten.

Die Düse Nummer 1 ist seit Ende 2018 am Einzylindermotor im Einsatz. Diese wird für die Blenduntersuchungen verwendet, da es sich hier um die Basisdüse für Dieselkraftstoff handelt.

Am Einzylindermotor wird eine Seriidieselpumpe von Projektpartner Vitesco Technologies Roding GmbH verwendet. Hier mussten bisher keine Modifikationen vorgenommen werden. Details hierzu finden sich in den Berichten des Projektpartners Vitesco Technologies Roding GmbH.

Nummer	HD [ml/30s]	Loch-anzahl	Höhen-winkel [°]	Produziert	Aufgebaut	Geliefert	Am Einzylindermotor untersucht
1	325	8	158	X	X	X	X
2	650	8	158	X	X	X	X
3	590	8	158	X	X	X	X
4	1000	8	158	X	X	X	X
5	800	8	146	X	X	X	
6	800	8	134	X	X	X	

Tabelle 6: Düsenvarianten für „C6.1.2 Einzylindermotoruntersuchung“ und deren Status

Die Ergebnisse der Motoruntersuchungen mit den Düsenvarianten sind in Kapitel 2.1.2 als Übersicht beschrieben. Ein detaillierter Bericht zu den Einzylindermotorergebnissen ist in den Berichten des Arbeitspaketpartners TU-Dresden zu finden.

2.2.2 Definition und Aufbau des FIE Systems für Motor- und Fahrzeuguntersuchungen in den Arbeitspaketen C6.1.3 und C6.1.4:

Die Einspritzsystemkomponenten für die Arbeitspakete C6.1.3 und C6.1.4 kann ebenso wie in Arbeitspakete C6.3.1 in die beiden Kategorien OME-Blendkraftstoff und OME100% untergliedert werden. Analog zum Vorgehen in Arbeitspaket C6.1.2 wurde das gesamte Einspritzsystem für die OME-Blenduntersuchungen nicht modifiziert. Es wurden lediglich neue Komponenten im Versuchsmotor (C6.1.3) und im Fahrzeug (C6.1.4) verbaut.

Für die OME100% wurden zunächst in einer frühen Projektphase die in Tabelle 7 gelisteten Düsenvarianten 2 – 4 definiert. Die Düsenvariante 1 stellt die Dieselerien-düse dar.

Nummer	HD [ml/30s]	Lochanzahl	Höhenwinkel [°]	Produziert	Aufgebaut	Geliefert
1	360	8	152	X	X	X
2	690	8	152	im Bestellprozess		
3	760	8	152	in Planung (Backup Lösung I)		
4	620	8	152	in Planung (Backup Lösung II)		

Tabelle 7: Düsenvarianten für „C6.1.3 Vollmotoruntersuchung“ und „C6.1.4 Demofahrzeug“ und deren Status

Diese wurden jedoch nach den ersten Ergebnissen vom Einzylindermotor verworfen, da hier gezeigt wurde, dass der abgeschätzte Düsendurchfluss für die zu erzielende Nennleistung des Motors zu gering war. Daher wurde in Abstimmung mit allen am Arbeitspaket C6.1 beteiligten Partnern (Vitesco Technologies, Vitesco Technologies Roding GmbH, HMETC und TU-Dresden) entschieden, den Durchfluss der Düsen zu erhöhen. Im gleichen Schritt wurde auch der Höhenwinkel analog zum Vorgehen am Einzylindermotor auf zwei Stufen verringert, so dass letztlich für den Vollmotor und für das Demofahrzeug die gleichen Düsenvarianten definiert und aufgebaut wurden, wie für den Einzylindermotor. Diese sind unter den Nummern 5 und 6 in der Tabelle 6 zu finden.

Für den Einsatz mit OME-Blendkraftstoff wurden die im Serienfahrzeug verwendeten Hochdruckpumpen DHP1 von Vitesco Technologies Roding GmbH verwendet. Die Hochdruckpumpen für die Untersuchungen mit OME100% sind modifizierte Dieselhochdruckpumpen. Die Anpassung bezieht sich auf das Zylindervolumen. Diese wurde so angepasst, dass der erhöhte Kraftstoffvolumenstrom bei OME100% im Vergleich zu Einsatz mit Dieselmotorkraftstoff möglich ist. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass das mittlere und maximale Pumpendrehmoment nicht die Begrenzungen des Motors überschreitet. Details zur Auslegung der OME Hochdruckpumpe finden sich in den Zwischenberichten und im Abschlussbericht des Projektpartners Vitesco Technologies Roding GmbH.

2.2.3 Lagerungstests mit OME-Diesel Blends:

Neben den Vortests, die für den Test der Haltbarkeit des Tanksystems im Versuchsfahrzeug vorgenommen wurden und in Kapitel 2.1.4.1 beschrieben sind, wurden weitere Lagerungstests mit Elastomeren vorgenommen, die im Einspritzsystem verbaut sind. Die Testproben wurden bei 50°C für 14 Tage (336 h) eingelagert und anschließend unter noch feuchten Bedingungen und nach Trocknung auf Volumenänderung und Härte untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 27 dargestellt. Die verschiedenen farbigen Balken zeigen die Ergebnisse für die Elastomere, die im Injektor (jeweils erster Balken), in der HD-Pumpe (jeweils zweiter bis vorletzte Balken) und im PDV (jeweils letzter Balken) verbaut sind.

Aus der Abbildung 27 a) und b) geht hervor, dass unter noch feuchten Bedingungen ein deutlich stärkeres Schwellen des Materials bei Lagerung in OME15% als in B7 Dieselmotorkraftstoff zu erkennen ist. Die Elastomere zeigen sich sehr unauffällig, wenn sie unter gleichen Bedingungen B7 Dieselmotorkraftstoff ausgesetzt werden. Dies mit OME15% zu erkennen Schwellung ist allerdings reversibel. Dies ist an der Volumenänderung nach Trocknung zu erkennen, Abbildung 27 c). Eine noch zu tolerierende nicht reversible Volumenänderung (nach Trocknung) liegt im Bereich von 5%. Dieser Wert wird weder von den Elastomeren in Diesel noch von denen in OME15% erreicht. Dennoch sollte die Schwellung von OME15% ausgesetzten Elastomeren aufgrund der Ergebnisse in Abbildung 27 a) und b) nicht vernachlässigt werden.

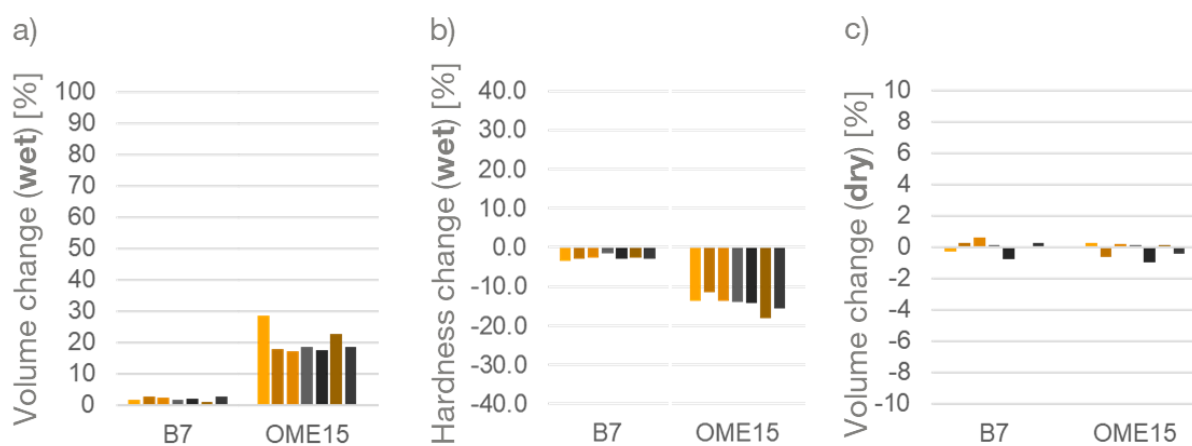


Abbildung 27: Ergebnis der Lagerungstests mit Dieselmotorkraftstoff (B7) und OME15% Blend mit verschiedenen Dichtungsmaterialien, die in der verwendeten HD-Pumpe, Injektor und PDV (Pressure Decay Valve) zum Einsatz kommen.

2.2.4 Generische Kavitations- und Erosionsuntersuchungen:

Durch die Einbeziehung der Motorlaufleistung in die Emissionsgrenzwerte (Thema: In-service Conformity: Bsp.: NO_x-Emission ≤ 80 mg/km nach 160000 km ab 2025) sind bei Vitesco Technologies spezielle Untersuchungen zur Beurteilung des

Verschleißverhaltens bestimmter Nasskomponenten motiviert worden. Die kavitationsbedingte Erosion in einer Einspritzdüse, kann infolge der Implosion von oberflächennahen Kavitationsblasen zu Materialschädigung u.a, im Düsenstritzloch führen, was neben der Verringerung der Bauteilfestigkeit, signifikante Änderungen im Sprayverhalten (z.B. Änderung Höhenwinkel) nach sich ziehen kann und somit als Risiko für die Einhaltung der o.g. legislativen Zielstellung zu sehen ist. Um die Erosionsensibilität von OME100% relativ zu Diesel bzw. Prüföl grundsätzlich bewerten zu können, wurde deshalb im Rahmen dieses Projektes auf einen vorhandenen Prüfstand zurückgegriffen, mit dem unter stationären Bedingungen die entstehende Kavitation und der Erosionsverschleiß in einem, dem Düsenstritzloch entlehnten, Strömungskanal beurteilt werden kann. Die folgende Abbildung zeigt das „Herzstück“ dieses Prüfstandes und verdeutlicht die Verschleißmessung:

Der linke Teil zeigt den Kraftstofffluss. Zwischen zwei Stahlbacken, die zwei gegenüberliegende Bohrungen aufweisen, wird eine Drossel eingelegt, die beidseitig mit Scheiben aus Saphierglas ummantelt wird. Dadurch kann die Strömung im Kanal (Länge 750µm) visualisiert werden. Das rechte Bild zeigt im linken Teil die, über Falschfarben dargestellte, Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Kavitation. Die schwarzen Bereiche in der Abbildung zeigen Drosselmateriale. Das rechte Bild entsteht nach einer bestimmten Testdauer. Die Materialerosion im Austrittsbereich der Drossel, also gegen Ende des Kavitationsgebietes ist signifikant erkennbar und damit über die Zeit bewertbar.

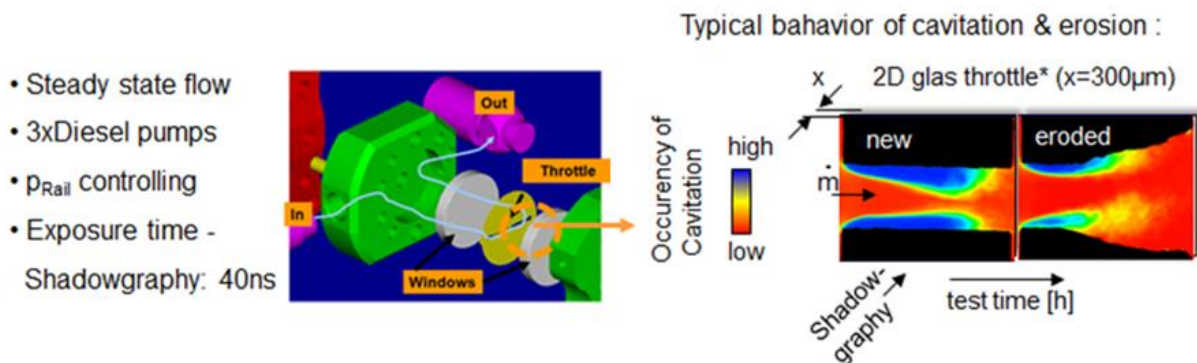


Abbildung 28: Prüfstand zur Beurteilung von Kavitation und Erosionsverschleiß ($p_{Rail_max} = 500\text{bar}$, $T_{fuel_max} = 150^\circ\text{C}$)

Die folgende Abbildung 29 zeigt nun beispielhaft gemessene Erosionsverläufe zwischen Prüföl (ISO 4113) und OME100% bei einem Raildruck von 300bar und jeweils konstanter Fluidtemperatur. Trotz der Varianzen in der Inkubationszeit (Zeitraum: Versuchsbeginn bis zum ersten erkennbaren Verschleiß in der Drossel) stellt sich der Zeitverlauf des Verschleißes mit Prüföl (blau) weitaus flacher dar, als mit OME100% (rot).

Die Basisversuche innerhalb dieses Projektes lassen somit den Schluss zu, dass mit OME100% eine höhere Verschleißrate bei kürzerer Inkubationszeit zu erwarten ist. Kurzum, das Risiko eines höheren Erosionsverschleißes zumindest innerhalb der

Verbundprojekt:
 Closed Carbon Cycle– Mobility:
 Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

Drossel / Düse aber evtl. auch an anderen kavitationskritischen Positionen im Einspritzsystem steigt mit OME100% deutlich an.

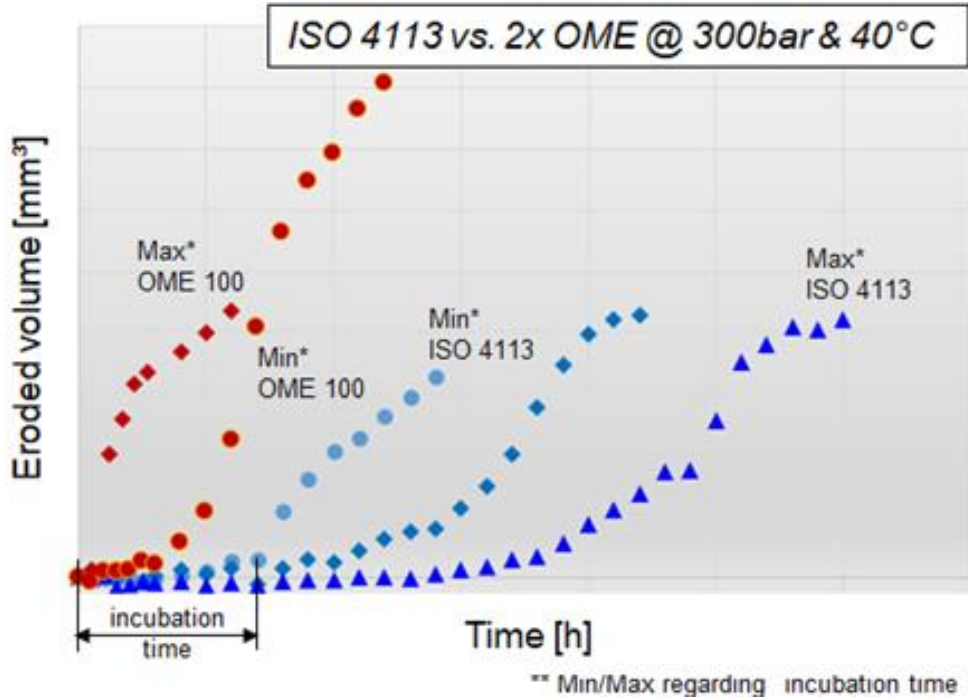


Abbildung 29: Verschleißverläufe Prüföl und OME100%



2.3 Arbeitspaket D6: Bereitstellung von Kraftstoffsensoren

Im Querschnittarbeitspaket D6 „Bereitstellung von Kraftstoffsensoren“ wurden zwei Arbeitspakete bedient.

- Querschnittsarbeit zu Arbeitspaket C1
- Querschnittsarbeit zu Arbeitspaket C6.1

Die hierzu erhaltenen Ergebnisse werden in den folgenden zwei Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 erläutert:

2.3.1 Querschnittsarbeit zu Arbeitspaket C1:

Der bei Vitesco Technologies zur Verfügung stehende und bereits sich im Serieneinsatz befindliche FlexFuel Sensor wird für die Blendederkennung von Ethanol in Benzin-Kraftstoff eingesetzt. Aufgrund der „chemischen Ähnlichkeit“ von Ethanol und dem im Arbeitspaket C1 verwendeten 2-Butanol wurde dieser FlexFuel Sensor ebenfalls für den Einsatz in diesem Arbeitspaket vorgesehen.

Zunächst wurden zwei Seriensensoren mit Ethanolkalibration für den Projektpartner Opel bereitgestellt. Mit diesen konnte der Projektpartner Opel den prinzipiellen Aufbau des Motorprüfstands realisieren.

Im Anschluss wurden die Kalibration des Sensors für Mischungen von 2-Butanol mit ethanolfreiem Benzin (E0) erzeugt. Hierzu wurden 5 verschiedene Kraftstoffmischungen verwendet:

- 100% E0 Benzin plus 0% 2-Butanol
- 75% E0 Benzin plus 25% 2-Butanol
- 50% E0 Benzin plus 50% 2-Butanol
- 25% E0 Benzin plus 75% 2-Butanol
- 0% E0 Benzin plus 100% 2-Butanol

Mit diesen Kraftstoffen wurde die Kalibration des Sensors bei verschiedenen Kraftstofftemperaturen vorgenommen. Die Messungen wurden jeweils 6-mal wiederholt. Daraus hat sich die in Abbildung 30 gezeigte Kennlinie des Messsignals (inklusive Signaltoleranzlinien) als Funktion des 2-Butanolgehalts in der Kraftstoffmischung ergeben.

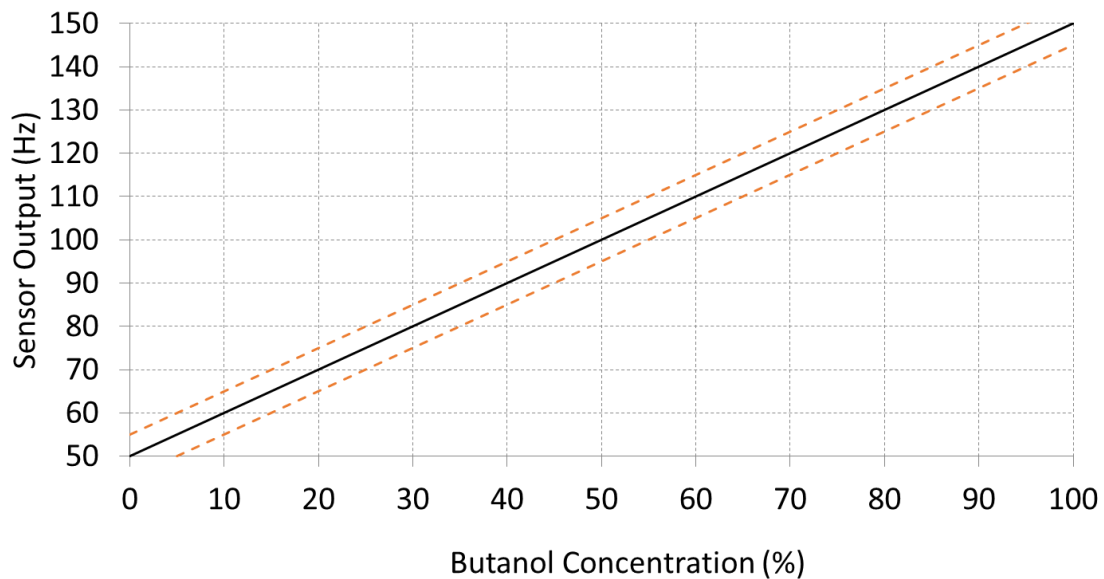


Abbildung 30: FlexFuel Sensor Kennlinie für 2-Butanol-Benzin Gemisch

Nach der Kalibrationserstellung wurden dem Projektpartner Opel 3 FlexFuel Sensoren mit 2-Butanolkalibration übergeben; zusätzlich wurden die Kalibrationsdaten und auch zwei Kabelbäume zum Anschluss der Sensoren bereitgestellt.

2.3.2 Querschnittsarbeit zu Arbeitspaket C6.1:

Die Blenderkennung von OME in Dieseldieselkraftstoff kann grundsätzlich an verschiedenen Positionen im Antriebssystem erfolgen:

1. Im Kraftstofftank / -leitung über einen dedizierten Blendsensor
2. Im Brennraum über eine Zylinderdruckindizierung oder eine andere „Verbrennungsdetektion“ oder thermodynamische Größen
3. Im Abgas über unterschiedliche Abgaseigenschaften und thermodynamische Größen
4. Im Niederdruck- oder Hochdruckkraftstoffpfad

Im Folgenden werden die genannten Möglichkeiten diskutiert. Letztlich wurde die unter 4. genannte Methodik als günstigste und wahrscheinlichste erachtet und damit auch weiterverfolgt.

Zu 1: Alle drei möglichen Positionen zur OME-Blenderkennung wurden für das Arbeitspaket C6.1 bei Vitesco Technologies intern mit Experten diskutiert und gegeneinander bewertet. Es wurde entschieden, den Einsatz eines Blendsensors nicht weiter zu verfolgen, da dieser zum einen bei Motor- und Fahrzeugherstellern grundsätzlich keine attraktive Lösung darstellt, dieser zudem mit Zusatzkosten verbunden ist, und des Weiteren, weil die bei Vitesco Technologies verwendete Sensortechnologie nicht für die Erkennung von OME in Diesel geeignet ist. Der bereits oben angesprochenen FlexFuel Sensor eignet sich nicht für OME, da die elektrische Leitfähigkeit beider im



Blend vorhandenen Kraftstoffe (OME und Diesel) sehr klein ist und sich nicht ausreichend stark voneinander unterscheiden, so dass mit dem Sensor keine ausreichend genaue Blenddetektion möglich ist.

Zu 2.: Eine Bewertung der Blenderkennung über die Zylinderdruckindizierung kann ebenso erfolgen. Wiederum setzt der Einsatz dieser Technologie den Einbau mindestens eines Zylinderdrucksensors in den Zylindern des Motors voraus. Dies ist wiederum eine als kritisch anzusehende Lösung im Hinblick auf die Zusatzkosten im Serieneinsatz.

Zu 3.: Die Blenderkennung im Abgas liefere grundsätzlich über teilweise im System vorhandene Technologien. Hier stehen Temperatur- und NO_x-Sensoren zur Verfügung, die prinzipiell für die Motor- und Abgasnachbehandlungssteuerung bereits verwendet werden. Die Auswertung dieser Messgrößen kann nun für die Blenderkennung eingesetzt werden. Allerdings wird auch hier versucht über zum Beispiel „Abgastemperaturmodelle“, diese Sensoren einzusparen, damit stünden diese nicht mehr für die Blenderkennung zur Verfügung. Des Weiteren wäre eine Blenderkennung über Abgaseigenschaften eine vergleichsweise langsame Prozedur, da der Kraftstoff zunächst verwendet (verbrannt) wird und erst im Abgas eine Bestimmung der Zusammensetzung des bereits verwendeten Kraftstoffs erfolgen würde. Das heißt, wenn die verwendete Kraftstoffzusammensetzung deutlich andere Eigenschaften hat, als die in der Motorsteuerung in diesem Moment hinterlegte, kann dies zu möglichen Problemen im Motorbetrieb führen und würde erst nach der Verbrennung im Abgas und damit eventuell zu spät erkannt werden.

Zu 4.: Die Hauptstrategie zur Blenderkennung kann sich nun auf verschiedene Funktionalitäten stützen, die bereits bei der Ethanol-Benzin-Blenderkennung im Serieneinsatz verwendet werden. Hier gibt es neben dem Einsatz des bereits oben angesprochenen FlexFuel Sensors, auch die Möglichkeit über sinnvolle, intelligente Verknüpfung von verschiedenen Funktionalitäten, die Kraftstoffzusammensetzung zu bestimmen, ohne einen zusätzlichen Sensor einzusetzen. Hierzu werden Informationen aus dem Niederdruck- oder Hochdruckkraftstoffpfad herangezogen. Es können Größen der Kraftstoffregelung herangezogen werden, die gegen Kraftstoffeigenschaften empfindlich sind.

Die im Rahmen des C3-Mobility Projektes entwickelte Blenderkennungsstrategie wird sich auf die Auswertung im System befindlicher Hardwarekomponenten stützen. Es werden keine neuen Blendsensoren verbaut, da sich im Verlauf des Projektes gezeigt hat, dass diese von Fahrzeugherstellerseite aus Kostengründen nicht akzeptiert werden würden.

Die Entwicklung einer Blenderkennungsstrategie stützt sich nun auf das Kraftstoffsystem, hier erfolgt die Erkennung von OME Anteilen in Diesel. Details hierzu können aus patentrechtlichen Gründen zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Abschlussberichts nicht genannt werden.



2.4 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Zu den von Vitesco Technologies bearbeiteten Themen dieses Fördervorhabens (Arbeitspaket C6.1, D5a, D6) sind keine Fortschritte an anderer Stelle bekannt.

2.5 Berichte, Vorträge und Veröffentlichungen

- [1] Mahler K., Saupe Ch., Atzler F., Kapp A., Deissenroth L., Kastner O., Leuteritz U., Einfluss von OME3-5 Blends auf die dieselmotorische Verbrennung, Emission Control 2019, Dresden, 2019
- [2] Saupe Ch., Atzler F., Kapp A., Deissenroth L., Kastner O., Leuteritz U., Potentiale von Oxymethylen-Dimethyl-Ether in der dieselmotorischen Verbrennung, Vorbereitet zur Veröffentlichung bei Emission Control 2020, Dresden, 2020

2.6 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Vom Autor wurde gemeinsam mit den Herren J. Drechsel und T. Schmitt, beide ehemalige Vitesco Technologies Mitarbeiter, eine Erfindungsmeldung mit der Nummer 2019E07542 zum Patent eingereicht. Bis zur Fertigstellung des Berichts lag das Patent noch zur Bearbeitung beim Patentamt.

Vom Autor wurde gemeinsam mit den Herren Andreas Ederer von Vitesco Technologies Roding GmbH und Stephan Revidat von HMETC eine weitere Erfindungsmeldung zur Blenddetektion erstellt, die aber bis zur Fertigstellung dieses Berichts noch nicht als Erfindungsmeldung eingereicht wurde.



3 References

- Avolio G., B. R. (2018). CWtL (carbon and water to liquid) fuels and electrification: enablers for reduction or well-to-wheel CO₂ and NO_x emissions. *30th edition international conference and exhibition, SIA Powertrain*. Rouen, France.
- Gaukel K., P. D. (2016). The fuel OME2: an example to pave the way to emission-neutral vehicles with internal combustion. In L. E. (Hrsg.), *Internationales Wiener Motorensymposium*. Vienna.
- Han D. Y., C. Z. (2016). Influence of polyoxymethylene dimethyl ethers on diesel fuel properties. In P. A. Energy Sources (Hrsg.). *Vol. 38, No. 18*, S. 2687–2692. Taylor & Francis Group .
- Härtl M., S. P. (2014). Synthetischer Dieselkraftstoff OME1 - Lösungsansatz für den Zielkonflikt NO_x-/Partikel-Emission. *MTZ Motorentechnische Zeitschrift*, 75(7-8), S. 68-73.
- Härtl M., S. P. (2015). Oxygenate screening on a heavy-duty diesel engine and emission characterisation of highly oxygenated oxymethylene ether fuel OME1. 153, 328-335. Von <https://doi.org/10.2016/j.fuel.2015.03.012> abgerufen
- Kastner O., A. G. (2017). Optimised diesel hybrid powertrain and control to minimize CO₂ and NO_x emissions. *Diesel Powertrain 3.0*. Ludwigsburg.
- Lautenschütz L., O. D. (2016). Physico-chemical properties and fuel characteristics of oxymethylene dialkyl ethers. In Fuel (Hrsg.), L. Lautenschütz, D. Oestreich, P. Seidenspinner, U. Arnold, E. Dinjus, J. Sauer: *Physico-chemical properties and fuel characteristics of oxymethylene dialkyl ethers*, *Fuel* 173 (2016) 129–137, 173, S. 129–137.
- Lump B, R. D. (2011). Oxymethylenether als Dieselkraftstoffzusätze der Zukunft. *MTZ Motorentechnische Zeitschrift*, 72(3), S. 198-202.
- Maus. (2019). Zukünftige Kraftstoffe - Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel. In A.-F. Springer Vieweg (Hrsg.), (S. 929-942).

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Einspritzsystem-, Motorbetrieb- und Blenderkennungsbewertung für die Nutzung von OME-Diesel Blends für PKW und leichte Nutzfahrzeuge	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr.-Ing. Kastner, Oliver	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2020
	6. Veröffentlichungsdatum 30.04.2020
	7. Form der Publikation keine
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Vitesco Technologies GmbH Siemensstraße 12, D-93055 Regensburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution keine
	10. Förderkennzeichen 19 18006 A
	11. Seitenzahl 64
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 6
	14. Tabellen 7
	15. Abbildungen 34
16. Zusätzliche Angaben keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek Hannover, Hannover, 30.04.2020	
18. Kurzfassung Die Vitesco Technologies GmbH wirkt unter dem Titel „Einspritzsystem-, Motorbetrieb- und Blenderkennungsbewertung für die Nutzung von OME-Diesel Blends für PKW und leichte Nutzfahrzeuge“ im Verbundprojekt C3-Mobility mit. In drei Arbeitspaketen erfolgte gemeinsam mit Partner aus der Industrie (HMETC, Vitesco Technologies Roding) und der Forschung (TU-Dresden) eine Bewertung der Nutzung von OME-Diesel Blendkraftstoffen in einem State-of-the Art, EU6d homologierten Dieselfahrzeug. Im Arbeitspaket D5a wurden die Einspritzsystemkomponenten für den Einsatz von OME-Diesel-Blend und OME100% Kraftstoff definiert, aufgebaut und in den geplanten Motoren verbaut, die sich bei Vitesco Technologies GmbH und an der TU-Dresden befinden. Für die Verwendung von OME100% Kraftstoff, muss das Düsendesign nicht nur an den deutlich geringeren Heizwert und die höhere Dichte von OME angepasst werden, sondern auch das unterschiedliche Brennverhalten berücksichtigt werden. Im Arbeitspaket D6 wurden zwei Detektionsmethoden erarbeitet, die für die Erkennung von OME Zumischung in Dieselmotoren verwendet werden können. Diese beruhen beide auf der Signalerfassung und -auswertung im Hochdruckkraftstoffpfad. Es werden charakteristische Signalverläufe im DIV (Digital Inlet Valve) und im PDV (Pressure Decay Valve) ausgewertet. Beide Signale erlauben eine Detektion des OME Anteils in einer OME-Diesel Mischung. Im Arbeitspaket C6.1. wurde verschiedene Aufgaben zu OME-Diesel Blends als auch zu OME100% Kraftstoff bearbeitet. Zunächst wurde in einer systemanalytischen Untersuchung die kritischen Untersysteme und kritischen Komponenten identifiziert, die für eine Nutzung von OME100% modifiziert werden müssen. Danach wurden die in D5a definierten und aufgebauten Einspritzsystemkomponenten für den Einsatz von OME100% am Einzylindermotor untersucht. Die OME-Diesel-Blenduntersuchungen (OME7% und OME15%) wurden an einem 4-Zylindermotorprüfstand und an einem Fahrzeug durchgeführt. Es zeigte sich, dass eine Zumischung von 7 % OME in Dieselmotoren die Grenzleistung darstellt, die noch ohne Hardware und Softwareanpassung aber auch ohne Kalibrationsanpassung in einem EU6 Dieselfahrzeug verwendet werden kann. Die NO _x Emissionen sind hier auf gleichem Niveau wie bei der Verwendung von Dieselmotoren, bei gleichzeitiger signifikanter Verringerung der Rußemissionen von ca. 20 % und der WtW-CO ₂ Emissionen von 6 – 10 %, abhängig vom betrachteten Fahrzyklus. Eine Zumischung von 15 % OME in Dieselmotoren ist die Grenzleistung für gleiche Hardware und Software aber mit angepasster Motorkalibration. Ohne Modifikation dieser Kalibration, sind die NO _x Emissionen um einen Faktor 2-4 höher als mit Diesel, je nach betrachtetem Fahrzyklus. Eine Kalibrationsanpassung reduziert die NO _x Emissionen auf Dieselniveau. Für OME15% ergaben sich stark reduzierte Rußemissionen von 30 – 45 % (je nach Zyklus) und eine Reduktion der TtW-CO ₂ Emissionen von ca. 1-2 % und die der WtW-CO ₂ Emissionen von ca. 17 %. Für beide Blends lagen die Emissionen anderer Schadstoffe, HC, CO, NH ₃ , CH ₄ , CH ₂ O, auf dem Niveau von Dieselmotoren. Insbesondere die im Vorfeld befürchteten erhöhten Methanemissionen lagen für die OME-Diesel-Blends auf einem sehr geringen Niveau. Die Fahrbarkeit der Fahrzeuge mit den OME7% und OME15% Blends war identisch zu der Dieselmotorenvariante (Serienfahrzeug).	
19. Schlagwörter OME, Oxymethylenether, Verbrennungsmotor, Dieselmotor, Einspritzsystem, Blenderkennung, OME7%, OME15%	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication)
3. title Injection system, engine operation and blend detection for usage of OME blended Diesel fuel in passenger and LDV vehicle	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr.-Ing. Kastner, Oliver	5. end of project 31.03.2020
	6. publication date 30.04.2020
	7. form of publication no
8. performing organization(s) (name, address) Vitesco Technologies GmbH Siemensstraße 12, D-93055 Regensburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 19 18006 A
	11. no. of pages 64
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 6
	14. no. of tables 7
	15. no. of figures 34
16. supplementary notes no	
17. presented at (title, place, date) Technische Informationsbibliothek Hannover, Hannover, 30.04.2020	
18. abstract Vitesco Trechnologies GmbH (VT) worked in the C3-Mobility project on "Injection system, engine operation and blend detection for usage of OME blended Diesel fuel in passenger and LDV vehicle". VT evaluated in three work packages together with project partners from industry (HMETC, Vitesco Technologies Roding GmbH) and research (TU-Dresden) the usability of OME blended Diesel fuel in a state-of-the-art EU6d homologated diesel vehicle. In work package 5a the fuel injection equipment was defined, set-up and mounted on the test engines located at VT in Regensburg and TU-Dresden. For OME100%, the nozzle configuration had to be adapted not only to the lower heating value and higher density, but also to the difference in combustion characteristic of OME compared to diesel fuel. In work package D6 two methods were developed for detection of OME fraction in Diesel fuel. The methods are based on analysis of characteristic data of the DIV (Digital Inlet Valve) and PDV (Pressure decay Valve), which are both required for high pressure control. In work package C6.1 various task with respect to OME blended diesel fuel and OME100% fuel were conducted. First, an holistic system analysis led to a list of most critical components in the powertrain, where the low pressure system, including high pressure pump and sealing material resulted to be most critical ones. Second, the FIE components, defined in WP D5a, were tested on a Single Cylinder Engine. Third, the OME blended diesel fuel was tested on a 4-cylinder engine and a demo vehicle. Here, it turned out, that OME7% is the limited OME blend for usage of a EU6d vehicle without any changes on hardware, software and calibration. The NO _x emission are on the same level as for diesel fuel, the particulate emission is reduced by app. 20 % and the WtW CO ₂ emission is reduced by 6 – 10 % depending on the driving cycle. If an OME15% fuel is used (15% OME in diesel fuel) the hardware and software can remain still the same, but the combustion engine calibration has to be adapted. Without modification, the NO _x emission were higher by a factor of 2 – 4 depending on the cycle. An adaptation of the calibration reduced the NO _x emissions back to the level of diesel fuel. At the same time the particulate emissions were reduced by 30 – 45 %, the TtW-CO ₂ emissions were reduced by app. 1 – 2 % and, finally, the WtW CO ₂ emissions were reduced by app. 17%, all depending on the tested cycle. For both blends (OME7% and OME15%) the emissions of other pollutants such as HC, CO, NH ₃ , CH ₄ , CH ₂ O were on the same level as for diesel fuel. Drivability of the OME7% and OME15% vehicles was always like the diesel reference vehicle.	
19. keywords OME, Oxymethylenether, internal combustion engine, diesel engine, fuel injection equipment, blend detection, OME7%, OME15%	
20. publisher	21. price