

SCHLUSSBERICHT

zum vom Bundesministerium für Bildung und Forschung
geförderten Vorhaben

Teil I: Kurzbericht [öffentlich]

Verbundvorhaben NAMOSYN: Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe

Teilvorhaben:

Flex Fuel Verbrennungsprozess und Feldtest mit adaptierten 1-Zylinder-Industriedieselmotoren

Laufzeit: 01.04.2019 bis 30.09.2022

Fördermaßnahme	Grundlagenforschung Energie
Förderbereich	Nachhaltige Mobilität mit synthetischen Kraftstoffen
Zuwendungsempfänger	Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG, Ruhstorf a. d. Rott
Förderkennzeichen	03SF0566M0
Autoren	Andreas Stadler Abteilungsleiter Thermodynamik
Datum	27.03.2023

GEFÖRDERT VOM



 Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Inhaltsverzeichnis Kurzbericht

1	Aufgabenstellung	1
2	Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt des Vorhabens	1
3	Ablauf des Vorhabens	2
4	Wesentliche Ergebnisse	2
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	2

1 Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben NAMOSYN als Ganzes hatte zum Ziel, branchenübergreifend die Grundlagen für die Einführung synthetischer Kraftstoffe zu schaffen, die sich unter ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Kriterien nachhaltig produzieren lassen. Hierzu sollten für verschiedene Kraftstoffalternativen für unterschiedliche Einsatzgebiete – mit dem Fokus auf Straßenfahrzeugen, Offroadfahrzeugen und mobilen Arbeitsmaschinen – umfassende FuE-Arbeiten durchgeführt werden. Des Weiteren sollten die Emissionsreduktionen, die Kraftstoffkonformität, sowie die reibungslose Implementierbarkeit der Kraftstoffe in bestehende Fahrzeuge und Infrastrukturen untersucht und bewertet werden. Im Forschungscluster FC 1A „OME für Dieselmotoren – Motorisches Verhalten“, an dem HATZ beteiligt war, wurde Oxymethylenether (OME (n=1-6)) als Diesel-Kraftstoff untersucht.

Dieselmotoren, die gemäß geltender Abgasrichtlinien regelkonform zertifiziert sind, sind in emissions-sensitiven Bereichen (z. B. Ballungsräumen) mit Zusatzanforderungen aus der Luftreinhalteverordnung und daraus resultierenden Immissionsrahmenbedingungen konfrontiert. Basierend auf einem elektronisch geregelten 1-Zylindermotor als Enabler-Technologie sollen diese Zusatzanforderungen mit einem Digitalisierungsansatz zur geopositionsabhängigen automatischen Umschaltung des Betriebsstoffes und einer thermodynamischen Flex-Fuel Betriebsstrategie (bedarfsgerecht Diesel oder OME) erfüllbar werden. Die Aufgabenstellungen der Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG (im Folgenden HATZ) im Teilvorhaben „Flex Fuel Verbrennungsprozess und Feldtest mit adaptierten 1-Zylinder-Industriedieselmotoren“ war im Einzelnen:

- Erforschung, Entwicklung und Realisierung eines energieeffizienten, umweltschonenden Flex Fuel Verbrennungsprozesses für 1-Zylinder-Industriedieselmotoren
- Adaption der betroffenen Motorkomponenten (z. B. Kolben, Zylinderkopf, Einspritzpumpe, Injektor, Magnetventil, Mehrkammertanksystem, virtueller Sensor zur Kraftstofferkennung)
- Digitalisierung zur automatischen, geopositionsabhängigen Umschaltung des Betriebsstoffes und der thermodynamischen Betriebsstrategie

2 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt des Vorhabens

Ausgangspunkt des Vorhabens waren die bereits aus Forschungsarbeiten bekannten sehr vorteilhaften Verbrennungseigenschaften von OME, die eine Einsparung an Rohemissionen im Bereich der Umgebungsluft ermöglichen. Die Umrüstung bestehender Fahrzeugflotten des innerstädtischen Verkehrs auf einen Betrieb mit OME böte die Möglichkeit, eine signifikante Emissionsreduzierung zu erreichen. Zum Zeitpunkt der Antragstellung war bekannt und veröffentlicht, dass

- der synthetische Kraftstoff OME wegen der fehlenden C-C Bindung und seines Sauerstoffgehaltes im dieselmotorischen Brennverfahren rußfrei verbrennt und in der Folge extrem niedrige Partikelemissionen im Bereich der Umgebungsbelastung erreichbar sind.
- durch die partikelfreie OME-Verbrennung, eine sehr gute Verträglichkeit der Verbrennung mit rückgeführtem Abgas (AGR) besteht. Es sind hohe AGR-Raten ohne die bekannten Probleme möglich, was zu einer ebenfalls sehr niedrigen NO_x-Rohemission führt.
- auch ohne Abgasnachbehandlung mit OME ein Emissionsniveau erreicht werden kann, welches in der Größenordnung der Umgebungsluft liegt.
- die Robustheit der OME-Verbrennung dazu führt, dass sie hinsichtlich der Einspritzstrategie im Vergleich zu Dieselmotoren wenig empfindlich reagiert. Diese Robustheit der Verbrennung versprach den Vorteil für Motorumrüstungen, dass eine weite Spreizung der Verbrennungsparameter genutzt werden kann, wodurch sich der Umrüstaufwand reduziert.
- die Kraftstoffeigenschaften bei der Verwendung einer Mischung von OME-3 bis OME-5 denen des Dieselmotors sehr ähnlich sind. Die zu verwendenden Additive waren ebenfalls weitgehend bekannt.
- aufgrund seiner physikalisch/chemischen Eigenschaften das Gefahrenpotential von OME sehr niedrig ist und darüber hinaus OME biologisch abbaubar ist.

Allerdings waren für den Einsatz von OME bei vorhandenen Motoren auch bereits einige Randbedingungen bekannt, welche Modifikationen an einigen Komponenten des Motors bzw. Kraftstoffsystems



erforderten. Insbesondere erfordert der durch den höheren Sauerstoffgehalt bedingte geringere Heizwert von OME im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoff einen höheren volumetrischen Durchsatz von OME, der mit dem Faktor rd. 1,7 zu berücksichtigen ist. Weiterhin beeinträchtigen die chemischen Eigenschaften von OME einen negativen Einfluss z. B. die Langzeitstabilität von Kunststoffen (bekannt z. B. Ausfall von Dichtungen von Hochdruckpumpen).

3 Ablauf des Vorhabens

Das Teilvorhaben von HATZ war Bestandteil des Arbeitspaket 2 „Nachrüstung von Dieselmotoren“ des Gesamtvorhabens NAMOSYN und untergliederte sich in acht Unterarbeitspakete (UAP):

Unterarbeitspakete (UAP)

UAP 1 Definition der Anforderungen und Rahmenbedingungen

UAP 2 Berechnung und Simulation

UAP 3 Komponentenentwicklung für Brennverfahren

UAP 4 Komponentenversuch und Komponentendauererprobung

UAP 5 Brennverfahrensentwicklung

UAP 6 Sensor- und Funktionsentwicklung Steuergerät

UAP 7 Digitalisierung

UAP 8 Dauererprobung Gesamtsystem

Darüber hinaus unterstützte HATZ die Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Regensburg im Arbeitspaket „Untersuchungen am Einzylinder-Motorprüfstand“ bei der Anpassung des Motorprüfstands und bei der Grundapplikation für den OME-Betrieb.

4 Wesentliche Ergebnisse

Für die von HATZ untersuchten kleinen Off-Highway-Serienmotoren (mobile Arbeitsmaschinen) ist unter Beibehaltung der Motorleistung ein nahezu rußfreier Betrieb möglich. In diesem speziellen Anwendungsbereich führt die Reduktion der NO_x - und Partikelemissionen bei der OME-Verbrennung dazu, dass neue Applikationsfreiheitsgrade zur Schadstoffreduktion und Wirkungsgradsteigerung ermöglicht werden. Insbesondere für stark kostengetriebene Kleindieselmotoren mit begrenzten Möglichkeiten zur Abgasnachbehandlung besteht mit OME ein sehr großes Emissionsminderungspotenzial. Auch entsteht über eine Anpassung der Einspritzstrategie das Potenzial, den motorischen Wirkungsgrad gegenüber dem Dieselmotorkraftstoff zu steigern. Um die Dauerhaltbarkeit solcher Motoren insbesondere im erforderlichen Volllastbereich bei der Verwendung von OME zu gewährleisten, muss der Motor neben den notwendigen Anpassungen zur Sicherstellung der Materialverträglichkeit im Kontakt mit OME auch bzgl. Hard- und Software angepasst werden. Ein Flex-Fuel-Betrieb in dem je nach Einsatzgebiet (z. B. in Ballungsräumen) bedarfsgerecht zwischen OME- und Dieselmotorkraftstoffbetrieb umgeschaltet werden kann, hat sich aufgrund eines grundlegenden Zielkonflikts zwischen möglichen Maßnahmen zur Erreichung eines dem Dieselmotorkraftstoff vergleichbaren Volllastverhaltens im OME-Betrieb und der zu gewährleistenden Emissionskonformität im Dieselmotorkraftstoffbetrieb nach aktuellem Stand in der Praxis als nicht umsetzbar erwiesen.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Konsortium des Gesamtvorhabens NAMOSYN, koordiniert durch die DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. in Frankfurt am Main, wurden Universitäten, Fraunhofer-Institute, Großforschungseinrichtungen, Industrieunternehmen, Verbände und Organisationen mit ausgewiesener Kompetenz und bereits bestehender Infrastruktur im Bereich der Forschung, Entwicklung und Evaluierung von synthetischen Kraftstoffen in mehreren Forschungsclustern als Partner und assoziierte Partner zusammengeführt (siehe Anhang).

Das Teilvorhaben von HATZ wurde in enger Abstimmung mit der OTH Regensburg durchgeführt. Darüber hinaus wurden Synergieeffekte mit anderen Partnern z. B. deren Erkenntnissen zu Materialverträglichkeiten genutzt und umfangreiche Daten Vermessungsergebnissen zur Verfügung gestellt z. B. dem Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS).



Anhang Teil I Kurzbericht

Konsortium NAMOSYN, hinzu kommen zahlreiche assoziierte Partner

- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg im Breisgau
- AUDI Aktiengesellschaft, Ingolstadt
- AVL Deutschland GmbH, Wiesbaden
- BASF SE, Ludwigshafen am Rhein
- BP Europa SE, Hamburg
- Clariant Produkte (Deutschland) GmbH, Frankfurt am Main
- DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Köln
- Evonik Operations GmbH, Essen
- Federal-Mogul Burscheid GmbH, Burscheid
- Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Stuttgart
- Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein, München
- IZES gGmbH, Saarbrücken
- Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen
- Linde GmbH, Pullach i. Isartal
- Mann + Hummel GmbH, Ludwigsburg
- Mitsubishi Power Europe GmbH, Duisburg
- OWI Science for Fuels gGmbH, Herzogenrath
- Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg
- Robert Bosch Gesellschaft mit beschränkter Haftung, Gerlingen
- Ruhr-Universität Bochum, Bochum
- RWE Power Aktiengesellschaft, Köln
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
- TEC4FUELS GmbH, Herzogenrath
- Technische Universität Darmstadt, Darmstadt
- Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Kaiserslautern
- Technische Universität München, München
- Umicore AG & Co. KG, Hanau
- ASG Analytik-Service AG, Neusäß

SCHLUSSBERICHT

zum vom Bundesministerium für Bildung und Forschung
geförderten Vorhaben

Teil II: Eingehende Darstellung [öffentlich]

Verbundvorhaben NAMOSYN: Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe

Teilvorhaben:

Flex Fuel Verbrennungsprozess und Feldtest mit adaptierten 1-Zylinder-Industriedieselmotoren

Laufzeit: 01.04.2019 bis 30.09.2022

Fördermaßnahme	Grundlagenforschung Energie
Förderbereich	Nachhaltige Mobilität mit synthetischen Kraftstoffen
Zuwendungsempfänger	Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG, Ruhstorf a. d. Rott
Förderkennzeichen	03SF0566M0
Autoren	Andreas Stadler Abteilungsleiter Thermodynamik
Datum	27.03.2023

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Inhaltsverzeichnis

1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	1
1.1	OME-Betrieb kleiner Off-Highway-Serienmotoren.....	1
1.2	Flex-Fuel-Betriebstrategie.....	16
1.3	Digitalisierungsansatz zur geositionsabhängigen automatischen Umschaltung des Betriebsstoffes	17
2	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	18
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	18
4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	18
5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	18
6	Erfolge oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	18

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Dieselmotoren, die gemäß geltender Abgasrichtlinien regelkonform zertifiziert sind, sind in emissions-sensitiven Bereichen (z. B. Ballungsräumen) mit Zusatzanforderungen aus der Luftreinhalteverordnung und daraus resultierenden Immissionsrahmenbedingungen konfrontiert. Die Aufgabenstellungen von HATZ im Teilvorhaben „Flex-Fuel-Verbrennungsprozess und Feldtest mit adaptierten 1-Zylinder-Industriedieselmotoren“ war es diese Zusatzanforderungen unter Einsatz von OME-Kraftstoff zu erfüllen.

Ziel der FuE-Aktivitäten war die gesamthafte Erforschung, Entwicklung, Realisierung und Validierung eines energieeffizienten und umweltschonenden Verbrennungsprozesses für 1-Zylinder-Industriedieselmotoren unter Nutzung von OME einschließlich der erforderlichen Adaption von Motorkomponenten (z. B. Kolben, Zylinderkopf, Einspritzpumpe, Injektor, Magnetventil, Tanksystem mit Kraftstofferkennung). Angestrebt wurde zudem die Möglichkeit einer geopositionsabhängigen Kraftstoffumschaltung des Industriedieselmotors zwischen Diesel- und OME-Betrieb (Flex-Fuel-Konzept). Die maximale Leistung der Industriedieselmotoren sollte dabei für den Diesel- und OME-Betrieb annähernd beibehalten werden.

Basierend auf einem elektronisch geregelten 1-Zylindermotor als Enabler-Technologie wurden im Teilvorhaben von HATZ Ergebnisse in drei wesentlichen Teilbereichen bearbeitet:

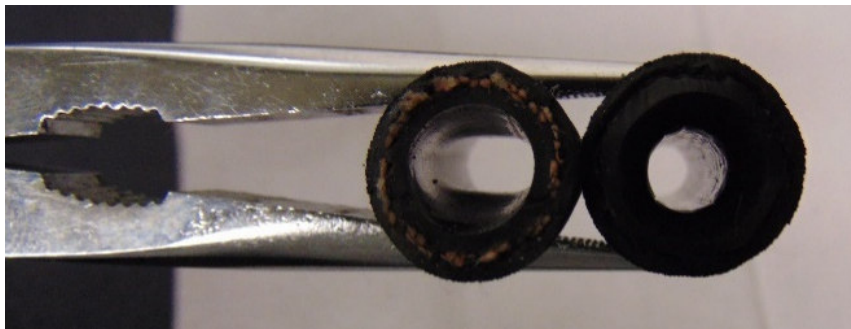
- (1) OME-Betrieb kleiner Off-Highway-Serienmotoren im Bereich mobiler Arbeitsmaschinen (s. folgendes Kapitel 1.1)
- (2) Flex-Fuel-Betriebsstrategie mit bedarfsgerechter Umschaltung zwischen Diesel- und OME-Kraftstoff (s. folgendes Kapitel 1.2)
- (3) Digitalisierungsansatz zur geopositionsabhängigen automatischen Umschaltung des Betriebsstoffes (s. folgendes Kapitel 1.3)

1.1 OME-Betrieb kleiner Off-Highway-Serienmotoren

Auf Basis des Standes der Wissenschaft und Technik hinsichtlich des OME-Betriebs standen die Materialverträglichkeit gegenüber den chemischen Eigenschaften des OME, notwendige Komponentenanpassungen insbesondere des Einspritzsystems sowie das erzielbare Betriebs- und Emissionsverhalten gegenüber dem Dieselmotor Vordergrund der FuE-Arbeiten. Folgende Ergebnisse konnten erzielt werden:

1.1.1 Materialverträglichkeit

Materialverträglichkeitsuntersuchungen serienmäßiger Dichtungswerkstoffe mit OME (Abb. 1: Kraftstoffschläuche, Abb. 2: O-Ringe) zeigten deutliches Quellen, welches zu einer Versprödung der Dichtungsmaterialien und in der Folge zu Undichtigkeiten führt. Dies deckt sich mit den Erfahrungen und Ergebnissen aus der Literatur und der Projektpartner zum Einsatz von Elastomeren¹.



¹ M. Kass, M. Wissink, C. Janke, R. Connatser und S. Curran, „Compatibility of Elastomers with Polyoxymethylene Dimethyl Ethers and Blends with Diesel,“ SAE International, 2020. [Online]. Available: <https://saemobilus.sae.org/content/2020-01-0620/>

Abb. 1: Materialverträglichkeit – NBR-Schlauch neu (links) und 4 Tage in OME (rechts)

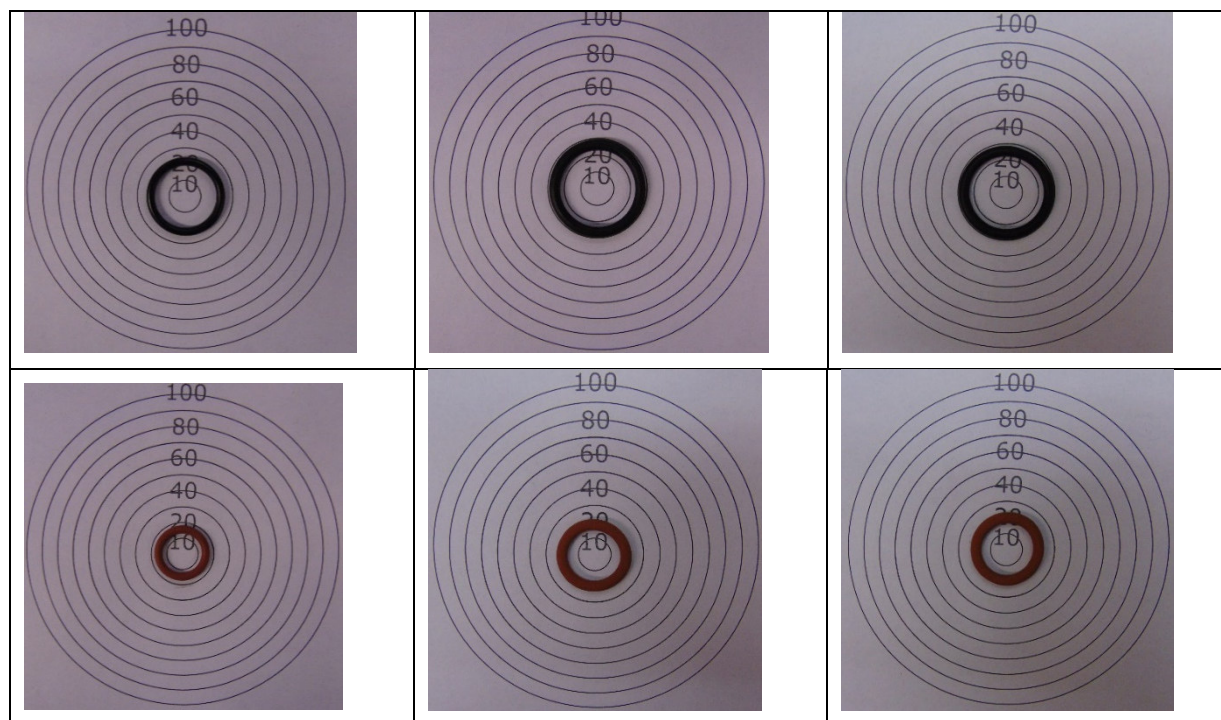


Abb. 2: Materialverträglichkeit – Quellversuche mit O-Ringen aus FKM (oben) und Polyethylen (unten).

Im Rahmen der Versuche kam es insbesondere an der Prüfstandsperipherie u. a. an der Kraftstoffmessanlage an Dichtungen, Membranteilen der Kraftstoffmessanlage, innerhalb von Druckreglern sowie an kraftstoffführenden Schläuchen und Schnellkupplungen zu extremen Materialausdehnungen bis hin zu Auflösungserscheinungen, die zu Verschmutzungen an Filtern und im Motor führten. Darüber hinaus zeigen einige Bestandteile des Kraftstoff- und Ölkreislaufs (v. a. Dichtungen, Schläuche, Kunststoffteile) ähnliche Erscheinungen.

Alle kraftstoffführenden Materialien wurden sowohl motor- als auch prüfstandseitig (Applikationsprüfstand und Dauerlaufprüfstand) gemäß Literatur für den Betrieb mit reinem OME geeignete Werkstoffe PTFE, EPDM, FFKM² und auch Edelstahl ersetzt. Nach diesen Maßnahmen sind keine weiteren Undichtigkeiten oder Materialverschleißerscheinungen aufgetreten.

1.1.2 Betriebsverhalten

Vollfaktorielle Kennfeldvermessungen mit Variationen des Einspritzpunktes mit Dieselkraftstoff dienten als Grundlage für die Modellvalidierung wie auch als Vergleichsbasis für die Potentialbewertung für den Einsatz von OME-Kraftstoff.

Die experimentellen Untersuchungen mit serienmäßiger Hardwarekonfiguration unter Volllast zeigten zunächst, dass sowohl Brennraumspitzendruck als auch die Abgastemperatur im OME-Betrieb im Vergleich zur herkömmlichen Dieselverbrennung nicht maßgeblich ansteigen und unterhalb der kritischen Grenzwerte bleiben. Eine kritische Größe war jedoch der Einspritzdruck, der bei Motordrehzahlen größer als 2.000 1/min den Grenzwert von 1.000 bar überschritt, obwohl die Motorleistung nicht annähernd der Serienleistung mit Dieselkraftstoff entsprach. Mit der serienmäßigen Hardwarekonfiguration ist ein

² D. Pélerin, K. Gaukel, M. Härtl und G. Wachtmeister, „Potentials to simplify the engine system using the alternative diesel fuels oxymethylene ether OME1 and OME3–6 on a heavy-duty engine,“ Fuel, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116231>.

OME-Betrieb in Drehzahlbereichen von 2.000-3.000 1/min ohne Überschreitung des Grenzwerts (vgl. nachfolgende Abb. 3) und somit negativer Beeinflussung der Dauerfestigkeit des Motors nicht möglich.

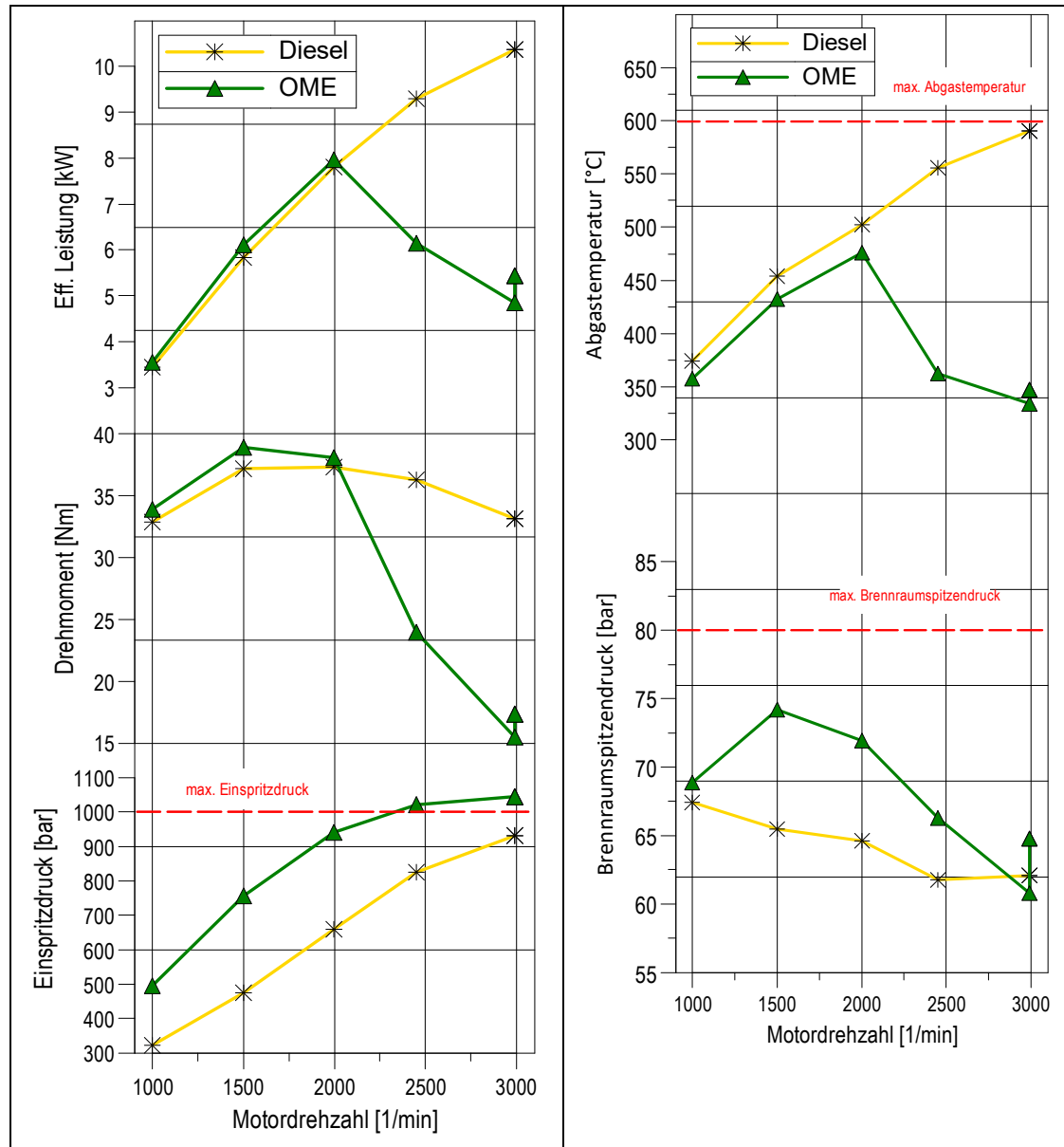


Abb. 3: Kritische Kenngröße hinsichtlich der Dauerfestigkeit des Triebwerks (Einspritzdruck, Abgastemperatur, Brennraumspitzendruck) für den Betrieb mit Diesel (gelb) und OME (grün). Hardwarekomponenten entsprechen in beiden Fällen der Serienkonfiguration.

Zusammenfassend lässt sich für ein Drehmoment von 25-40 Nm (Teil- und Vollast) festhalten (vgl. nachfolgende Abb. 4):

- Im Drehzahlbereich zwischen 900-2.000 1/min ist die Motorleistung mit OME-Kraftstoff analog zum Dieselbetrieb ohne konstruktive Komponentenanpassungen darstellbar.
- Im Drehzahlbereich von etwa 2.000-2.450 1/min ist die Motorleistung mit OME-Kraftstoff analog zum Dieselbetrieb nur mit Hilfe konstruktiver Komponentenanpassungen darstellbar (vgl. dazu nachfolgenden Kapitel 1.1.3 Komponentenanpassungen).

- Im Drehzahlbereich von 2.450-3.000 1/min ist die Motorleistung mit OME-Kraftstoff analog zum Dieselmotorbetrieb mit dem bestehenden Einspritzsystem, auch mit Hilfe konstruktiver Anpassungen der serienmäßigen Hardwarekonfiguration, nicht darstellbar.

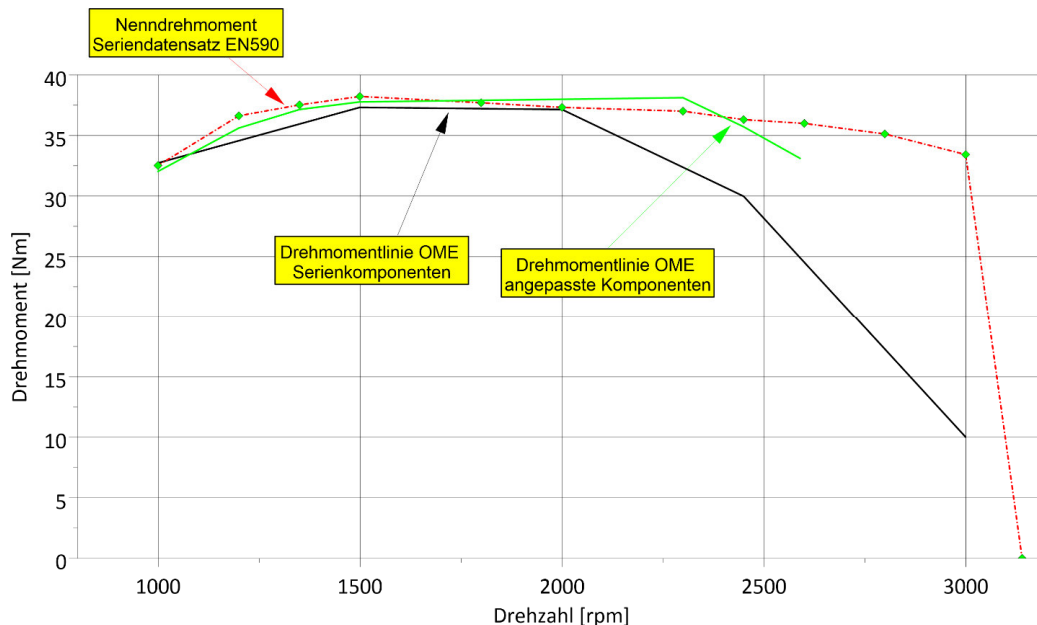


Abb. 4: Erweiterung des Motorbetriebsbereiches mit OME durch Anpassung der Komponenten

Der limitierende Faktor hinsichtlich der erzielbaren Motorleistung ist vor allem das serienmäßige Einspritzsystem und dessen Komponenten wie Hochdruckleitungen, Injektor und das Magnetventil zur Steuerung der Einspritzung. Bei Untersuchungen zur Abgasrückführung (AGR) zur Verbesserung der Emissionswerte gegenüber der Serienhardwarekonfiguration zeigte sich, dass es bei Nenndrehzahl (3.000 1/min) und maximal möglicher Leistung zu einer zu starken Verlangsamung der Gemischbildung und Verbrennung kommt. Es kam zu einem Motorschaden. Dieser wurde darauf zurückgeführt, dass aufgrund einer ungünstigen Einspritzstrahlführung, hervorgerufen durch eine zu lange Einspritzdauer, während der Expansionsphase Motoröl von der Zylinderwand abgewaschen wurde. Dies führte zu Schäden am bewegten Kolben im Bereich der Berührungsfläche zum Zylinder (sog. Kolbenfressen). Eine Erweiterung des Motorbetriebskennfeld durch konstruktive Anpassungen der serienmäßigen Hardwarekomponenten über eine Nenndrehzahl von 2.450 1/min konnte im Vorhaben nicht ohne Beeinträchtigung der Hardware (Motorschaden) erreicht werden.

Ein möglicher Lösungsansatz zur Erreichung der erforderlichen Nenndrehzahl von 3.000 1/min im OME-Betrieb ist ein deutlich komplexeres Common-Rail Einspritzsystem mit drehzahlunabhängiger Bereitstellung des Einspritzdrucks in Verbindung mit den Möglichkeiten der Mehrfacheinspritzungen. Die erforderlichen Änderungen betreffen die Kernkomponenten Hochdruckpumpe mit Zulaufsteuerung, ein Rail zur flexiblen Druckbereitstellung mit Hochdruckregelventil sowie einen Common-Rail Injektor. Die zu erwartenden Systemkosten sind jedoch im kostensensitiven Segment der betrachteten kleinen Off-Highway-Serienmotoren wirtschaftlich nicht serienmäßig durchsetzbar und wurden im Vorhaben nicht weiter untersucht, da eine serienmäßige Hardwarekonfiguration im Vordergrund der Betrachtung stand.

1.1.3 Emissionsverhalten

Untersuchungen zum Emissionsverhalten wurden an einem 1D90E-Motor (Versuchsträger) mit einem Hubraum von 0,722 l und einer Nennleistung von 10,5 kW durchgeführt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Betriebspunkte (Teillastpunkt: 20 Nm, Volllastpunkt: 36 Nm) bei einer konstanten Drehzahl von 2.000 1/min betrachtet. Es erfolgte ein Vergleich der Emissionen und der thermodynamischen Größen beim Betrieb mit reinem OME und herkömmlichen Dieselmotor-Kraftstoff (EN590) (vgl. nach-

folgende Abb. 5). Der Verbrennungsschwerpunkt (MFB₅₀) bei der OME-Verbrennung wurde über die Veränderung des Einspritzbeginns manuell auf denselben Wert eingestellt wie bei der Dieselerbrennung (= Serienapplikation), um einen Vergleich des Verbrennungsprozesses und der Emissionen zu ermöglichen.

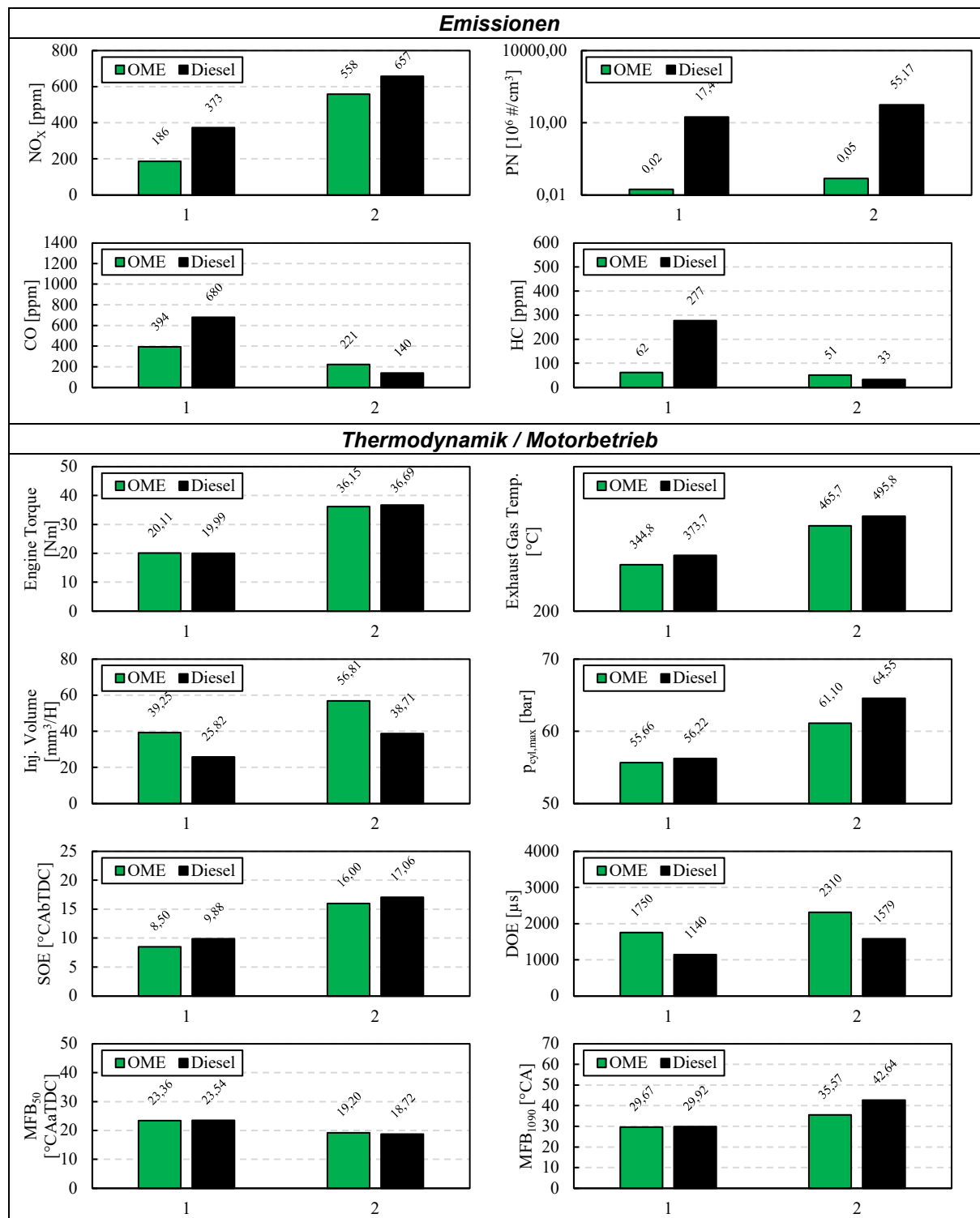


Abb. 5: OME (grün) und Dieselerbrennung (schwarz) im Vergleich: Thermodynamik und Emissionen im Motorbetrieb bei 2000 1/min in Teillast (Punkt 1, 20 Nm) und Volllast (Punkt 2, 36 Nm).

Schlussbericht

Teil II Eingehende Darstellung [öffentlich]

Verbundvorhaben NAMOSYN: Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe
Teilvorhaben Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG

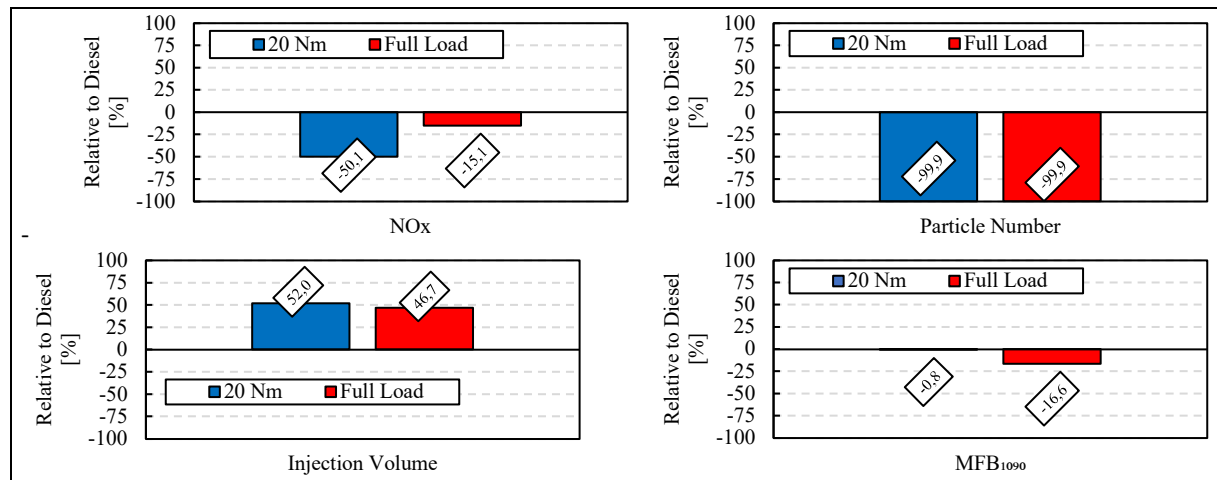


Abb. 6: Messdaten im Motorbetrieb, OME relativ zu Diesel. Blau: Teillast (20 Nm, 2.000 1/min). Rot: Vollast (36 Nm, 2.000 1/min)

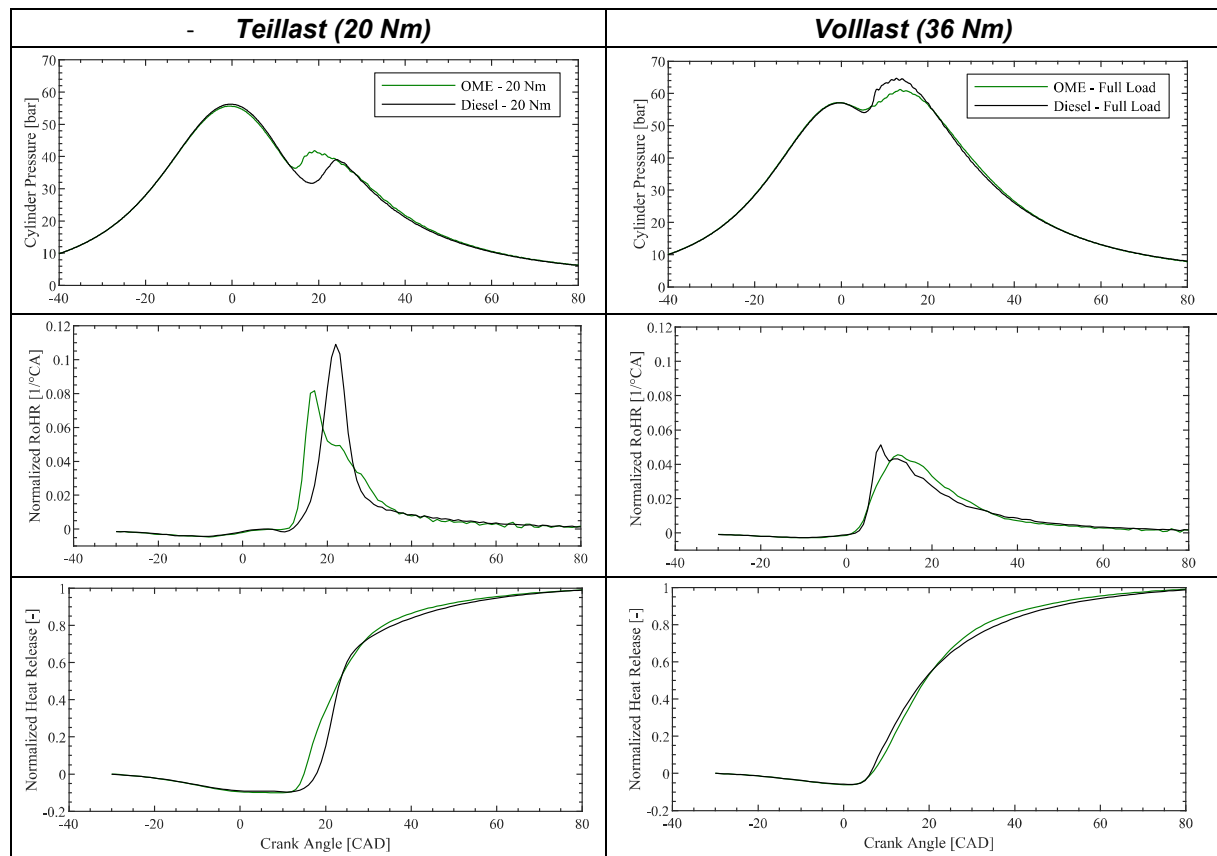





Abb. 7: Verbrennungsprozess im Vergleich: OME (grün), Diesel (schwarz) in Teillast (links) und Vollast (rechts). Zylinderdruckverlauf (oben), normierter Brennverlauf (Mitte), normierter Summenbrennverlauf (unten)

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der OME-Kraftstoff das Potential bietet sowohl die Partikelemissionen als auch die NO_x-Emissionen deutlich abzusenken. Der Zündverzöger bei OME-Betrieb ist deutlich verkürzt. Somit resultiert ebenfalls ein geringerer Anteil vorgemischter Wärmefreisetzung in Verbindung mit reduzierten Spitzendrücken und Temperaturen, weshalb die NO_x-Emissionen reduziert werden können. Die Ergebnisse zu Emissionen und Thermodynamik/Motorbetrieb in den Abbildung 5 bis 7 sind wie folgt zu erläutern:

- **Ergebnisse Partikelemissionen, PN:** Nahezu partikel- und rußfreie Verbrennung mit OME im Vergleich zu Diesel. In beiden Lastbereichen ist eine enorme Reduzierung der 99 % Partikelemissionen durch den Einsatz von OME zu beobachten (vgl. Abb. 6, Particle Number). Dies ist auf den zusätzlichen, kraftstoffgebundenen Sauerstoffgehalt und die fehlenden C-C Bindungen im Kraftstoff zurückzuführen.
- **Ergebnisse Stickoxide, NOx: deutlich weniger NOx mit OME:** Die Emissionen reduzieren sich mit OME um 50 % in Teillast und sind um 15 % in der Volllast im direkten Vergleich zum Diesel (vgl. Abb. 6, NOx). Grund: Vermutlich hat OME eine höhere, spezifische Verdampfungsenthalpie, wodurch die deutlich erhöhte Einspritzmenge (vgl. Abb. 6, Inj. Volume) zu einer Abkühlung des Brennraums führt. Dies resultiert in geringeren Spitzentemperaturen und weniger NOx. Diese Theorie lässt sich anhand der max. Wärmefreisetzungsrate (vgl. Abb. 7, RoHR) plausibilisieren. Die max. Wärmefreisetzung ist für OME in beiden Betriebspunkte geringer. Dies lässt auf geringere Spitzentemperaturen schließen.
- **Ergebnisse Kohlenmonoxid, CO und Kohlenwasserstoffe, HC:** in Teillast geringer, vermutlich durch vollständigere Verbrennung des OME. In Volllast höhere Emissionen mit OME, evtl. verursacht durch ungünstige Strahleindringtiefe o. ä. (Spritzen auf Kolben oder Laufbuchse → mehr CO / HC).
- **Ergebnisse Abgastemperaturen (MFB, mass fraction burnt):** Mit OME geringer, MFB₁₀₋₉₀: Verbrennung ist mit OME v. a. in der Volllast schneller. Grund ist der deutlich schnellere Ausbrand bedingt durch eine schnellere Verbrennung und reduziert HC Emissionen.
- **Ergebnisse Bestromungsbeginn (Start of Energizing, SOE):** Obwohl die Bestromungsdauer (DOE) deutlich erhöht ist, liegt der SOE (bei konstantem Verbrennungsschwerpunkt MFB₅₀) mit OME in einem ähnlichen Bereich wie im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff. Dies spricht erneut für die deutlich schnellere Verbrennung des OME und reduziert HC Emissionen.

Die Erreichung der zu erfüllenden Emissionsgrenzwerte stellt sich im Vergleich zwischen Diesel- und OME-Kraftstoff (mit / ohne DOC – Dieseloxidationskatalysator) wie folgt dar:

Abgaskomponente	Zu erfüllende Grenzwerte*	Diesel mit DOC (ohne DOC)	OME ohne DOC	Zielerreichung
NO _x +HC (Stickoxide, Kohlenwasserstoffe)	7,5 g/kWh	5,75 g/kWh (5,95 g/kWh)	4,97 g/kWh	
CO (Kohlenmonoxid)	6,6 g/kWh	0,63 g/kWh (4,11 g/kWh)	2,23 g/kWh	
PM (Partikelemissionen)	0,4 g/kWh	0,17 g/kWh (0,19 g/kWh)	0,01 g/kWh	

* Grenzwerte EPA Tier 4 final und EU Stage V für Leistungsklasse 8≤kW<19, Abgastest: NRSC-G2@2600 U/min

Im folgenden Kapitel 1.1.4 wird auf durchgeführte Komponentenanpassungen und die durch sie bedingte Beeinflussung des Emissionsverhaltens eingegangen.

1.1.4 Komponentenanpassungen

Vor dem Hintergrund einer Komplexitätsreduzierung im Vorhaben sowie einer späteren Verwertbarkeit der Projektergebnisse wurde die Zielsetzung verfolgt, möglichst ein Gleichteilprinzip umzusetzen und den angestrebten Flex-Fuel-Betrieb dementsprechend mit möglichst geringen Änderungen an der Motorhardware umzusetzen. Die komplexen Bauteile wie Kolben, Kolbenringpaket, Kolbenbolzen in



Wechselwirkung mit dem Zylinderkurbelgehäuse, die sehr stark emissionsoptimiert entwickelt sind, wurden daher nicht angepasst.

Zudem hatte sich in ersten experimentellen Untersuchungen gezeigt, dass

- das Einspritzsystem den größten Stellhebel im Brennverfahren darstellt, um eine Anpassung des Motorbetrieb (Gemischbildung und Verbrennung) auf den OME-Kraftstoff zu erreichen. Daher wurde sich im Vorhaben auf die Injektor- und Kraftstoffpumpenentwicklung sowie das Niederdrucksystem konzentriert.
- das zu erwartende Emissionspotential voraussichtlich mit der bestehenden Serienkonfiguration des Kolbens erreicht werden kann. Zusätzlich hätte eine Anpassung am Kolben eine sehr aufwändige Absicherung hinsichtlich des Zusammenspiels aus Kolben, Kolbenringpaket, Zylinderlaufbuchse und Kurbelgehäuse sowie des Schmierfilmhaushalts bedingt.
- eine Optimierung der Motorkühlung (Lüfterrad, Luftführung) ist nicht notwendig ist, da keine nennenswerte Erhöhung der thermischen Beanspruchung (Indikator: Öltemperatur bei max. Leistung) des Motors auftraten. Für den OME-Betrieb wurde daher die vorhandene Luftführung und Motorölkonditionierung als ausreichend erachtet.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden verschiedene Komponentenanpassungen vorgenommen und anschließend einer Dauererprobung des Gesamtsystems unterzogen. Die Komponentenanpassungen erfolgten mit der Zielsetzung

- (1) Kompensation der geringeren volumetrischen Energiedichte des OME
- (2) Erweiterung des Betriebskennfelds zur Erreichung der erforderlichen Motorleistung
- (3) Lambda 1 Konzept
- (4) Beeinflussung des Emissionsverhaltens

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der einzelnen Anpassungen eingegangen.

(1) Kompensation der volumetrischen Energiedichte des OME

Zur Kompensation der geringeren volumetrischen Energiedichte des OME gegenüber Dieselmotor (1,65-fach geringere Energiedichte) wurden sieben verschiedene Prototypeninjektoren mit erhöhtem hydraulischem Durchfluss ausgelegt, gefertigt und untersucht. Damit wird die Einspritz- und Brenndauer reduziert. Im Vergleich zum Serieninjektor (hydraulischer Durchfluss 890 cm³/min) besitzen die Prototypeninjektoren einen hydraulischen Durchfluss von 1.000-1.600 cm³/min (in ca. 100 cm³/min Abstufung). Dieser wurde in Abhängigkeit des Injektor-Nadelhubs vermessen (vgl. nachfolgende Abb. 8). Die erreichten Durchflussraten entsprechen einer bis zu 1,8-fachen Erhöhung der Durchflussrate und kompensiert damit die 1,65-fach geringere Energiedichte des OME. Durch die verschiedenen Durchflussraten werden im motorischen Betrieb unterschiedliche Einspritzdauern bei identischer Motorlast dargestellt.

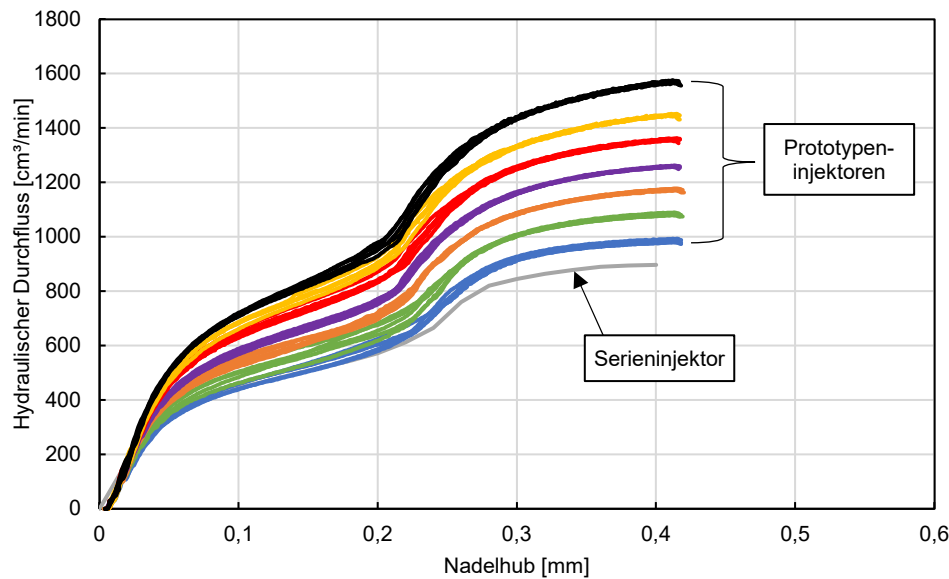


Abb. 8: Hydraulischer Durchfluss – Serieninjektor (max. 890 cm³/min, grau) und Prototypeninjektoren (max. 1.000-1.600 cm³/min).

(2) Erweiterung des Betriebskennfelds zur Erreichung der erforderlichen Motorleistung

Wie in Kapitel 1.1.2 dargestellt, ist die Motorleistung mit OME-Kraftstoff analog zum Dieselmotor nur mit Hilfe konstruktiver Komponenten Anpassungen darstellbar.

Da das Einspritzsystem des Einzylindermotors keine Entkopplung von Einspritzdruck, Einspritzzeitpunkt und Motordrehzahl ermöglicht (wie dies z. B. bei einem Common-Rail System der Fall wäre), wurde die Serien-Hochdruckpumpe mit verschiedenen Pumpenelementen ausgerüstet (Durchmesser 7,5 mm/8,0 mm/8,5 mm). Durch die Vergrößerung des Durchmessers wird mehr Kraftstoff verdichtet, wodurch der Einspritzdruck steigt.

Um den Prozess der Kraftstoffeinspritzung möglichst kurz zu gestalten, wurden Hochdruckpumpenelemente mit verschiedenem Durchmesser im Bereich der maximalen Leistung untersucht (vgl. nachfolgende Abb. 9, links). Hierfür wurde ein Prototypeninjektor mit einem hydraulischen Durchfluss von 1.247 ccm/min verwendet, welcher die Mitte des in obiger Abb. 8 dargestellten Injektoren-Portfolios darstellt. Es zeigte sich, dass die Einspritzdauer (und damit die Brenndauer) durch größere Pumpenelemente sinkt. Jedoch geht damit ein deutlicher Anstieg des Einspritzdrucks einher. Mit dem größten Pumpenelement (\varnothing 8,5 mm) stieg dieser bereits ab einer Motordrehzahl von etwa 2.000 1/min bis auf den maximal zulässigen Einspritzdruck von 1.000 bar. Die Darstellung der Serienleistung bei höheren Drehzahlen war durch den mit der Motordrehzahl zunehmenden Einspritzdruck nicht möglich. Deshalb wurde für weitere Untersuchungen eine Hochdruckpumpe mit dem Pumpenelement (PE) von 7,5 mm Durchmesser verwendet.

Um eine Absenkung des Einspritzdrucks zu bewirken, wurden Injektoren mit größerem hydraulischem Durchfluss untersucht. Letzterer bewirkt eine verkürzte Einspritzdauer und die damit gewünschte Absenkung des Einspritzdrucks (vgl. nachfolgende Abb. 9, Mitte). Jedoch führt die steigende Durchflussrate zu einer schlechteren Gemischaufbereitung und folglich deutlich erhöhten CO-Emissionen im Vergleich zum Serienmotor (betrieben mit herkömmlichem Dieselmotor). Hier wird die Ursache in einer ungünstigen Strahlführung vermutet, welche das Benetzen des Kolbens mit Kraftstoff verursacht.

Durch eine Vergrößerung des Düsenvorstandes (DV) wurde anschließend die Distanz zwischen Injektor und Brennraum (respektive Kolben) schrittweise erhöht. Hiermit lassen sich im Vergleich zum Ausgangszustand (DV = 1,0 mm, vgl. nachfolgende Abb. 9, rechts) größere Motorleistungen bei deutlich verbesserten CO-Emissionen darstellen. Bei einem Düsenvorstand von DV = 2,5 mm konnte die serienmäßige Leistung des Dieselmotors bei vergleichbaren CO-Emissionen realisiert werden.

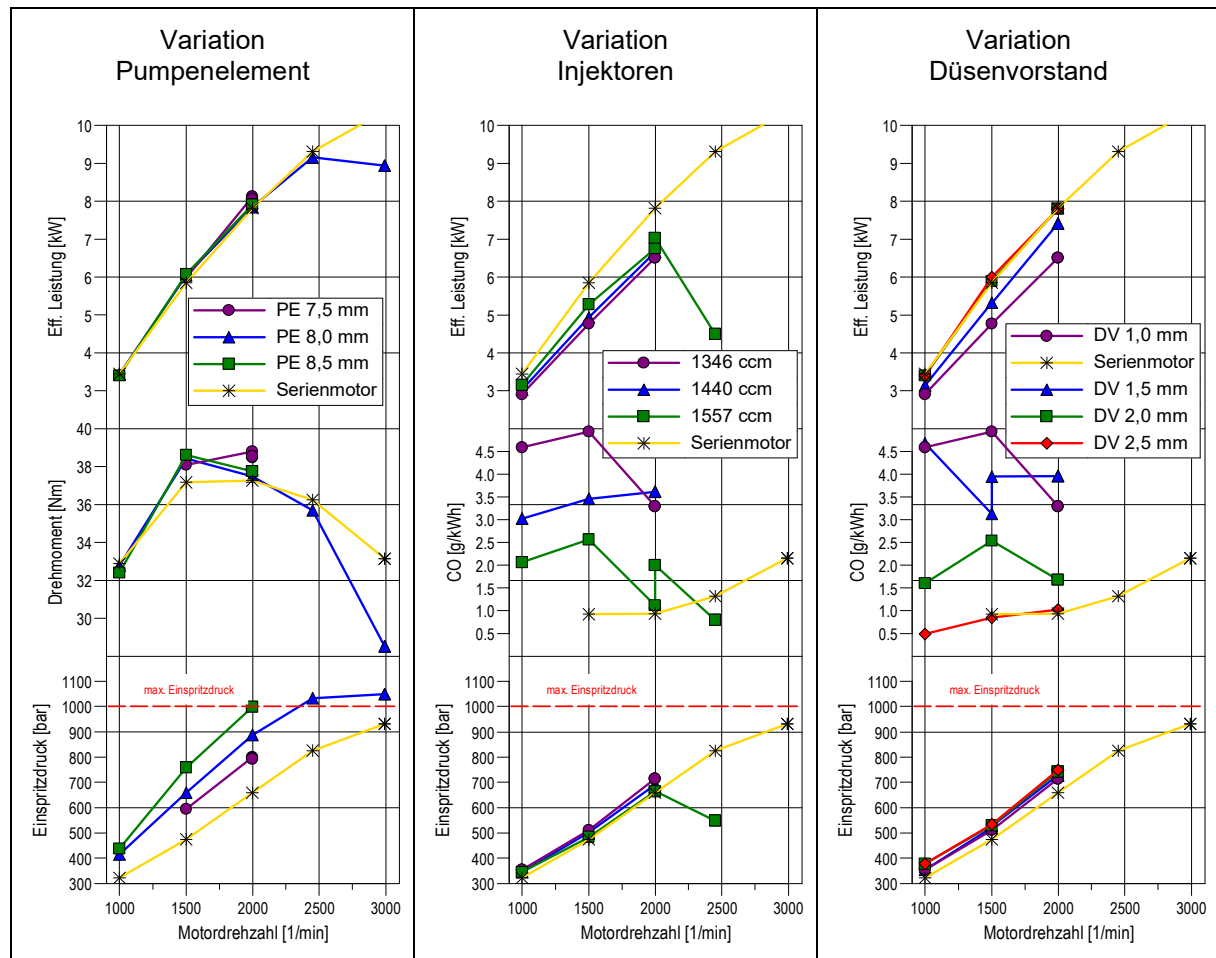


Abb. 9: Untersuchung von Hardwarekomponenten und deren Einfluss auf die Motorleistung, CO-Emissionen sowie den Einspritzdruck. Variationen von links nach rechts: Hochdruckpumpelemente (Konstanten: Injektor 1247ccm/min, DV = 1,5 mm), Prototypeninjektoren mit verschiedenem hydraulischem Durchfluss (Konstanten: PE = 7,5 mm, DV = 1,0 mm), Düsenvorstand (Konstanten: Injektor 1346 ccm/min, PE = 7,5 mm).

Im weiteren Vorgehen wurden verschiedene Kombinationen aus Injektoren und Düsenvorstand untersucht, um die Darstellung der Serienleistung bei Nenndrehzahl (3.000 1/min) zu prüfen. Im Vorhaben konnte jedoch aufgrund hardwareseitiger Limitierungen (Überschreitung der Grenzwerte des max. Einspritzdrucks) eine Drehzahl von 2.450 1/min nicht überschritten werden.

Nach Abschluss der Untersuchungen und Definition geeigneter Hardwarekomponenten folgt die Applikation und Erstellung eines Datensatzes unter Berücksichtigung der serienmäßigen Leistung und unter Einhaltung und Unterschreitung geltender Abgasnormen.

(3) Lambda 1 Konzept

Aufgrund des theoretischen Freiheitsgrades der Absenkung des Luftverhältnisses durch die rußfreie Verbrennung von OME und der damit verbundenen Eliminierung der Rußgrenze der dieselmotorischen Verbrennung, ist ein Lambda-1-Betrieb mit OME denkbar. Dessen Anwendung hätte den Vorteil, dass als AGN-Konzept ein 3-Wege-Katalysator analog zu Ottomotoren infrage kommen könnte, welcher eine NOx-Reduktion ermöglichen würde.

Um den Motorbetrieb unter stöchiometrischen Bedingungen (λ , Lambda = 1,0) zu untersuchen, wurde die Ansaugstrecke des Motors um eine elektrisch ansteuerbare Drosselklappe erweitert. Durch das Schließen der Drosselklappe wird der Ansaugluftmassenstrom und die Zylinderfüllung reduziert, wodurch das Verbrennungsluftverhältnis vom Magerbetrieb ($\lambda > 1.0$) in Richtung Stöchiometrie ($\lambda = 1.0$) abgesenkt wird. Dies reduziert die NOx-Emissionen im herkömmlichen Dieselmotorenverfahren aufgrund

des zunehmenden Mangels an Sauerstoff, welcher neben hohen Brennraumtemperaturen der Haupttreiber der Stickoxidbildung ist.

Nachfolgende Abbildung 10 veranschaulicht diesen Sachverhalt für verschiedene Abgasrückführungsvariationen (AGR-Variationen) mit unterschiedlichen Drosseldurchmessern. Hier wurde der Verbrennungsschwerpunkt bei der Absenkung des Verbrennungsluftverhältnisses durch eine Frühverstellung des Einspritzbeginns konstant gehalten. Dies wirkt der zunehmend verschleppten Verbrennung entgegen und gewährleistet vergleichbare Betriebsbedingungen. Die Reduzierung der Stickoxide ist in allen dargestellten Betriebspunkten eindeutig erkennbar. Der Drosseldurchmesser zur AGR hat einen deutlichen Einfluss auf die NO_x-Reduzierung, jedoch zeigen alle Varianten einen erheblichen Anstieg der CO-Emissionen im Bereich $1.5 < \lambda < 2.0$. Dies deutet auf eine zunehmend unvollständigere Verbrennung hin, welche sich in noch fetteren Bereichen ($\lambda < 1.5$) durch einen exponentiellen Anstieg von CO-Emissionen und Kraftstoffverbrauch bemerkbar macht. Zudem steigen die HC-Emissionen nahe dem stöchiometrischen Betrieb. Das Brennverfahren war bereits in deutlich überstöchiometrischen Bereichen ($\lambda \approx 1.2$) instabil und von Zündaussetzern charakterisiert.

Der Einzylinder-Saugmotor verfügt neben dem Einspritzbeginn über keine weiteren Applikationsparameter, welche es erlauben würden, das Brennverfahren einzustellen. Aufgrund des exponentiellen Anstiegs der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs im bereits überstöchiometrischen Betrieb, wird ein Motorbetrieb bei $\lambda = 1$ als nicht sinnvoll für unsere Systemanwendungen erachtet. Die notwendige Abgasnachbehandlung (potenziell 3-Wege-Katalysator bei $\lambda = 1,0$) und die damit steigende Systemkomplexität, sowie die damit einhergehenden Mehrkosten des Antriebssystems, stehen in keinem Verhältnis zum Nutzen. Bereits im Magerbetrieb bedingt die OME-Applikation, durch die niedrige Energiedichte des OME, einen deutlichen Kraftstoffmehrverbrauch. Diesen Effekt mit einer zusätzlichen Verschlechterung des Verbrauchs im fetten Motorbetrieb zu multiplizieren, ist im Hinblick auf die Marktakzeptanz nicht zielführend.

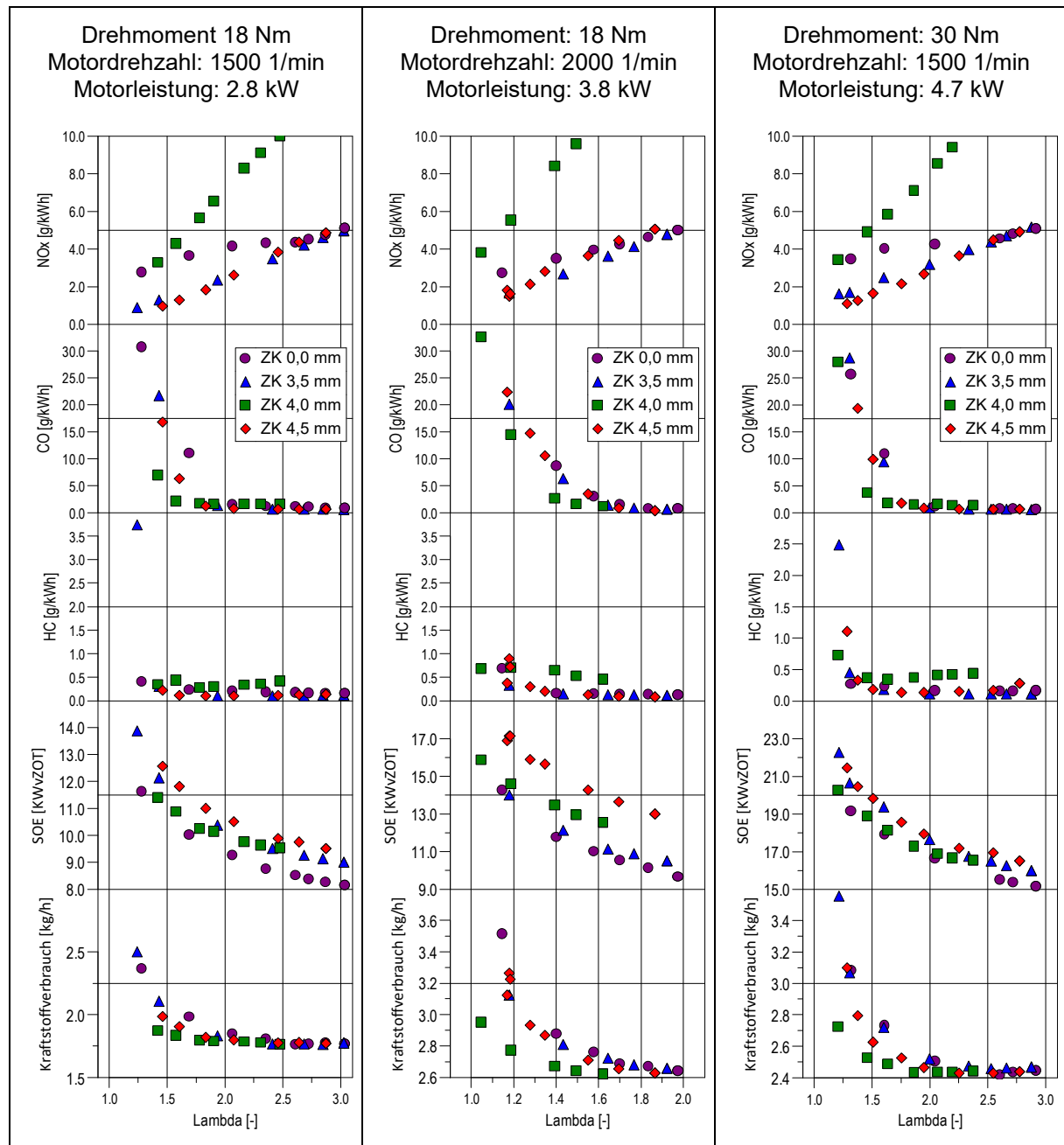


Abb. 10: Lambda-Variation bei verschiedenen Betriebspunkten. Von links nach rechts: 2.8 kW (18 Nm bei 1.500 1/min), 3.8 kW (18 Nm bei 2.000 1/min), 4.7 kW (30 Nm bei 1.500 1/min).

(4) Beeinflussung des Emissionsverhaltens

Zunächst wurde der Kraftstoff OME mit der serienmäßigen Hardwarekonfiguration des Dieselmotors untersucht. Beim HATZ Einzylinder-Saugmotor beeinflusst der Bestromungsbeginn (SOE) der Hochdruckpumpe (UCV) maßgeblich das Emissionsverhalten. Der SOE wurde unter verschiedenen Motorlasten und -drehzahlen variiert, um das grundsätzliche Emissions- und Leistungsverhalten des OME mit dem 1D90E Einzylindermotor zu beurteilen (vgl. nachfolgende Abb. 11). Die NO_x-Emissionen sinken mit zunehmend später Einspritzung (d. h. sinkendem SOE), ähnlich dem herkömmlichem Dieselmotorenverfahren. Jedoch steigen damit die CO- und HC-Emissionen aufgrund der unvollständigeren Verbrennung, speziell bei niedrigem Drehmoment deutlich an. Im Teil- und Vollastbetrieb sind die CO- und HC-Emissionen aufgrund der hohen Brennraumtemperaturen kaum von der SOE-Variation beeinflusst. Dieses Motorverhalten ist drehzahlunabhängig.

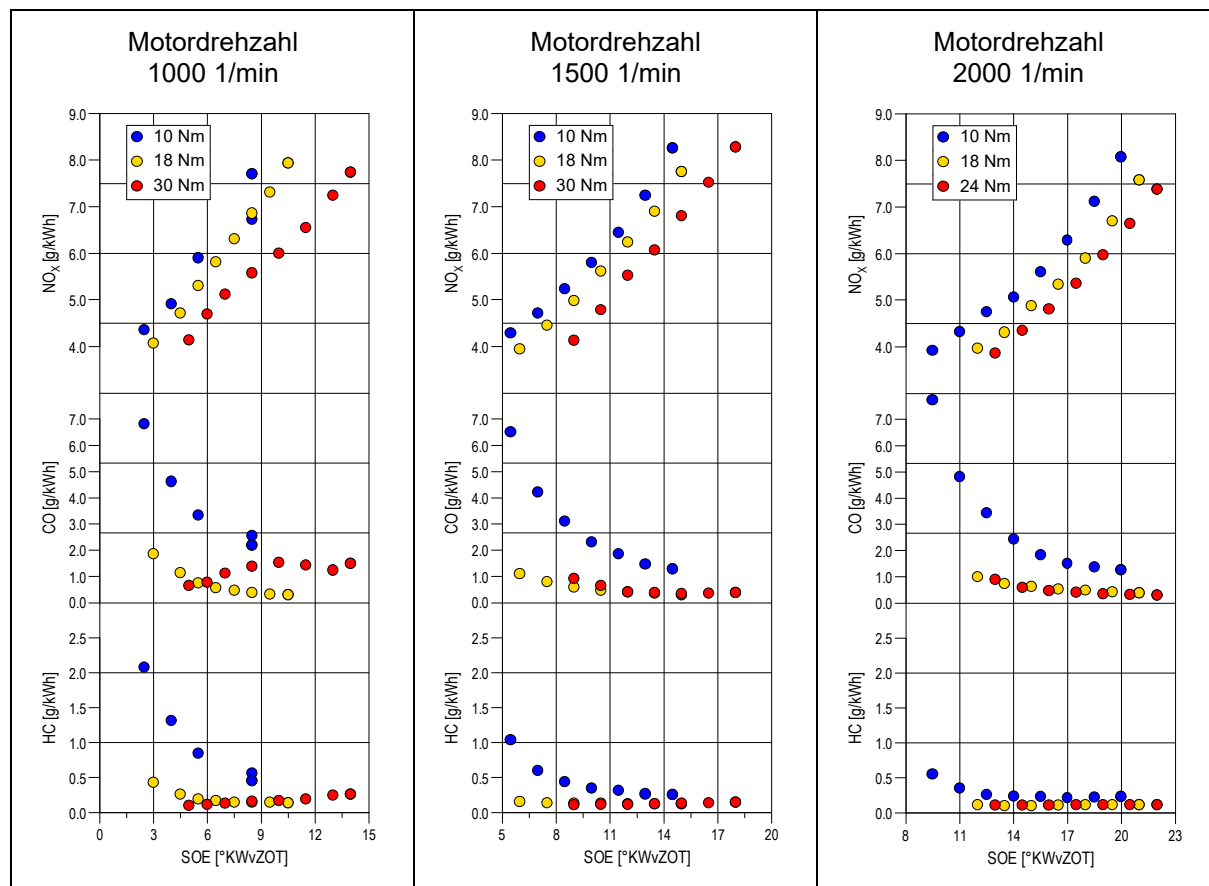


Abb. 11: Variation des Einspritzbeginns (SOE) und Auswirkungen auf die Emissionen (von oben nach unten: NO_x, CO, HC) bei steigender Motordrehzahl (von links nach rechts: 1.000 1/min, 1.500 1/min, 2.000 1/min) und verschiedenen Motorlasten.

Im nächsten Schritt wurden verschiedene Drosseldurchmesser (0,0 mm/3,5 mm/4,0 mm/4,5 mm/5,0 mm) zur AGR untersucht, um den Effekt auf die Emissionen im Teil- und Niedriglastbetrieb zu bewerten bzw. zu verbessern. Nachfolgende Abbildung 12 zeigt, dass die NO_x-Emissionen mit zunehmendem Durchmesser sinken. Dieser Effekt ist unabhängig von der Motorlast und auf die steigenden, internen Abgasrückführungen zurückzuführen. Zudem führen größere Drosseldurchmesser zu besseren HC- und CO-Emissionen.

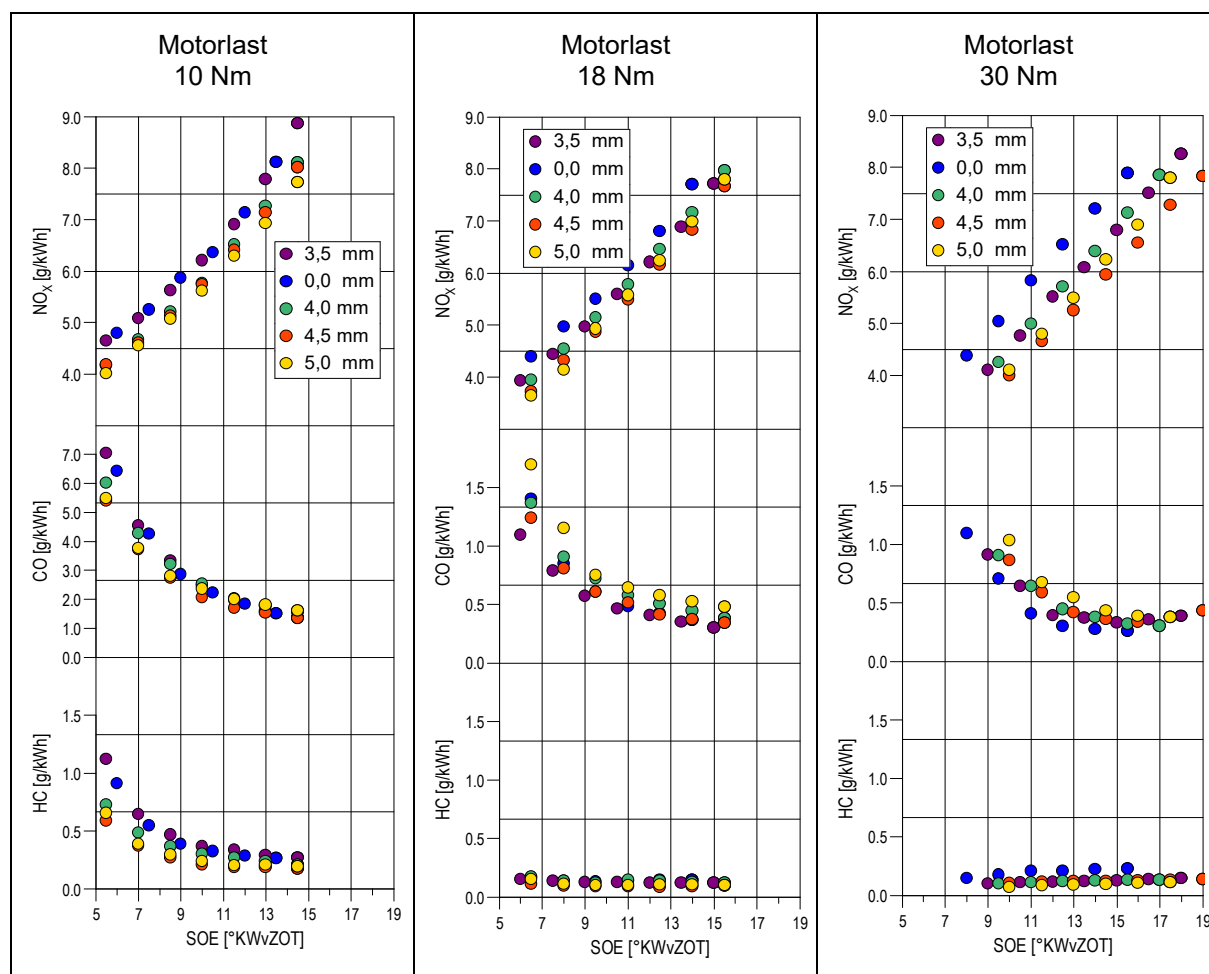


Abbildung 12: Variation des Einspritzbeginns (SOE) und Auswirkungen auf die Emissionen (von oben nach unten: NO_x, CO, HC) bei steigender Motorlast (von links nach rechts: 10 Nm, 18 m, 30 Nm) und AGR-Variationen mit verschiedenen Drosseldurchmessern

Untersuchungen der 5,0 mm Drosseldurchmesser bei Nenndrehzahl (3.000 1/min) und maximal möglicher Leistung zeigten jedoch, dass die Gemischbildung und Verbrennung zu stark verlangsamt wird. Motoröl wurde während der Expansion von der Zylinderwand abgewaschen. Dies führte zu einem Motorschaden (Kolbenfressen). Aufgrund der langsamen Verbrennung sind große Drosseldurchmesser nicht für den Volllastbetrieb bei Nenndrehzahl geeignet, wodurch die Nennleistung des Serien-Dieselmotors nicht dargestellt werden kann. Für weitere Untersuchungen verschiedener Injektoren und Hochdruckpumpen wurde deshalb ein Drosseldurchmesser von 3,5 mm verwendet.

Die finale Applikation wurde durch stationäre und transiente Abgastests validiert. Die Absicherung aller Komponenten erfolgte anschließend am Dauerlaufprüfstand.

1.1.5 Ergebnisse der Erprobung des Gesamtsystems am Prüfstand

Anhand verschiedenster Motorenversuche in einem breiten Applikationsgebiet auch über längere Zeiträume zeigt sich ein stabiles Emissionsverhalten des Versuchsträgers (1D90E Motor) im OME-Betrieb.

Dies deutet darauf hin, dass sich keine Ablagerungsbildung im Einlasskanal und im Bereich Einspritzdüse bilden, die die Emissionsstabilität beeinträchtigen würden.

Unter Anpassung der Motorkomponenten für den OME-Betrieb wurde ein dauerhafter Motorbetrieb am Dauerlaufprüfstand in einem Prüflauf von insgesamt 350 Stunden abgesichert. Dazu wurde der Prüfstand mit OME-verträglichen Materialien ausgestattet.

Der Dauerlauf wurde im NRTC (non-road-transient-cycle) als Standardzyklus für mobile Maschinen und Arbeitsgeräte in Dauerschleife durchgeführt, dieser entspricht einem repräsentativen Lastkollektiv für einen universellen Einsatz des Motors (vgl. Abb. 13).

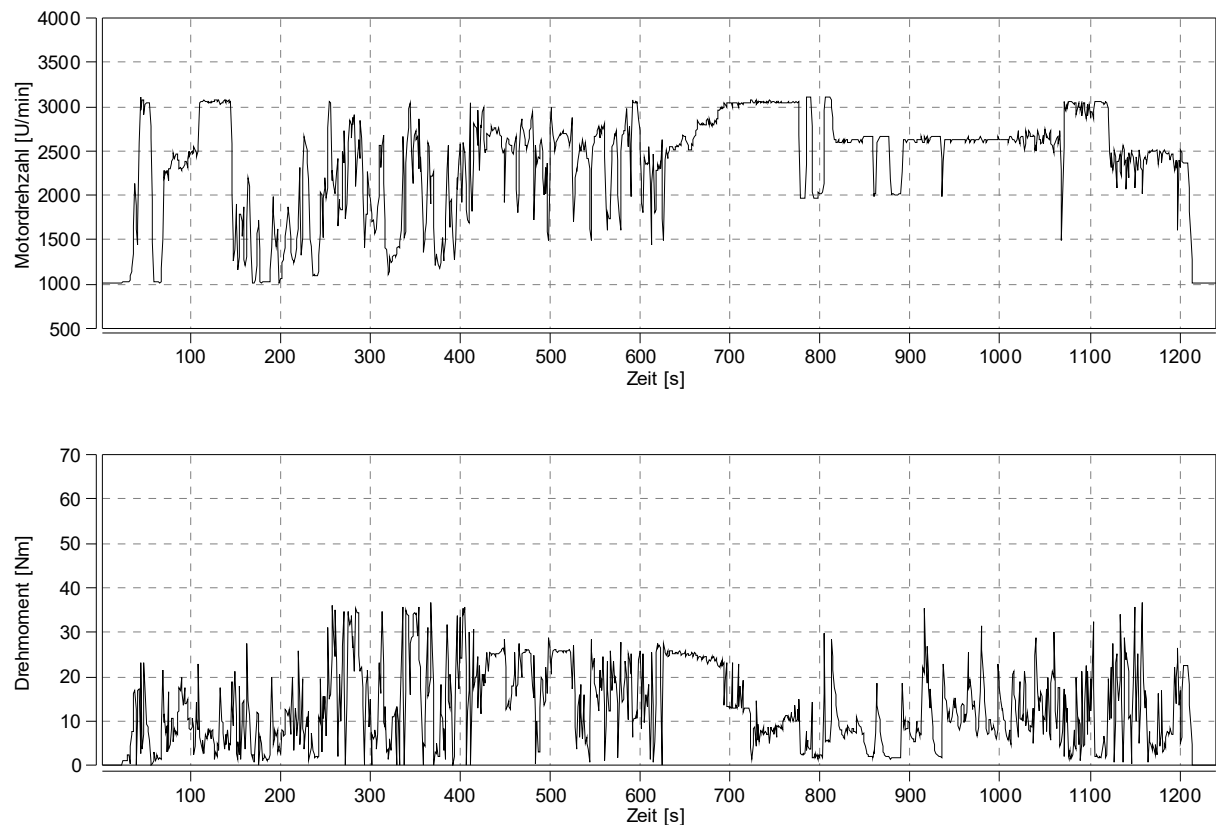


Abb.13: NRTC-Zyklus Dauerlaufprogramm, oben: Motordrehzahl, unten: Drehmoment

Folgende auf den OME-Betrieb angepasster Hardwarekonfiguration des Versuchsträgers (1D90E Motor) wurde geprüft:

- Prototypinjektor Durchfluss 1.250 cm³/min mit 2,0 mm Düsenvorstand
- Zylinderkopf Serie
- Pumpenelement 8,0 mm

Folgende Ergebnisse sind aus dem Dauerlauf abzuleiten:

- Im Prüflauf von insgesamt 350 h kam es nicht zum Ausfall des Motors.
- Am Referenzmesspunkt (Drehmoment = 26 Nm, Drehzahl = 2.600 1/min) wurden über die Zeit keine Verschlechterungen des OME-Verbrauchs festgestellt, die auf eine negative Beeinflussung des Motors durch den OME-Kraftstoff hinweisen würden.
- Insbesondere im Niederdruckkreis ist, aufgrund der genutzten Komponenten fertig gelieferter Pumpensysteme, auf die Materialverträglichkeit der Komponenten ein besonderes Augenmerk zu legen. Im Rahmen des Dauerlaufs kam es wiederholt zu Ausfällen der elektronischen Vorförderpumpen bedingt durch die bekannten auftretenden Undichtigkeiten, hervorgerufen im Kontakt zwischen Kunststoffmaterialien und OME-Kraftstoff. Bei den untersuchten Vorförderpumpen haben sich zwei der drei Pumpen für den dauerhaften Betrieb mit OME ungeeignet erwiesen.

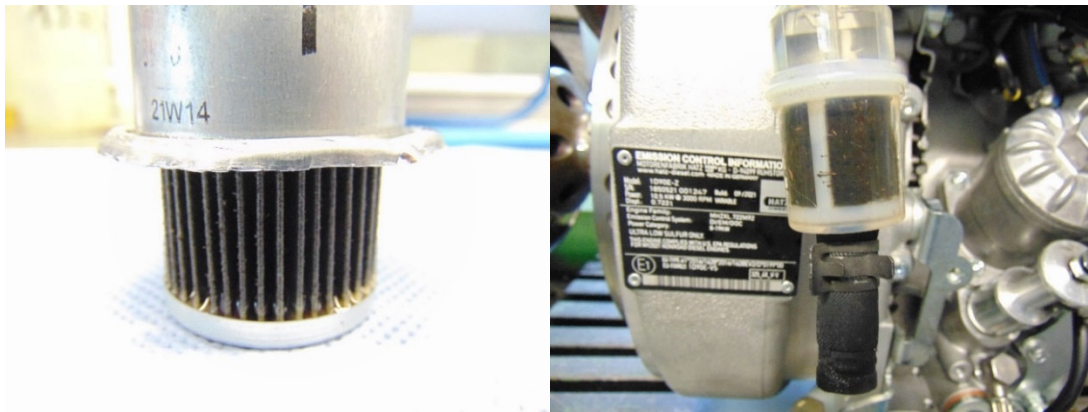


Abb. 14: Beschädigungen und Ablagerungen an Kraftstoffhaupt- (links) und -vorfilter (rechts)

- Im Rahmen der Befundung des Versuchsträgers nach Abschluss des Dauerlaufs (vgl. Abb. 14)
 - konnten keine mechanischen Schäden festgestellt werden;
 - zeigten die Einspritzdüsen keine bei Dieselmotoren häufig auftretenden Verkokungen, was auf die angestrebte rußfreie Verbrennung hinweist.



Abb. 15: Injektorspitze ohne Verkokungen bei Befundung nach Dauerlauf

Die Dauererprobung im NRTC ist repräsentativ, um die wichtigsten Lastkollektive der verschiedenen Applikationen nachzustellen. Für den reinen OME-Betrieb ist der NRTC ausreichend, Feldversuche sind aufgrund mangelnder Breite weniger repräsentativ und nicht zielführend.

Im Vorhabensverlauf hat sich herausgestellt, dass der ursprünglich angestrebte Flex-Fuel-Betrieb von Diesel und OME aufgrund des Zielkonflikts zwischen der Senkung des Einspritzdrucks (OME-Betrieb) und der Emissionskonformität (Dieselbetrieb) bei gleicher Hardwarekonfiguration nach aktuellem Stand in der Praxis nicht umsetzbar ist. Eine weitere Betrachtung des Flex-Fuel-Konzepts ist daher im Vorhaben entfallen und somit auch die ursprünglich im Hinblick auf den Flex-Fuel-Betrieb geplanten Feldversuche.

1.2 Flex-Fuel-Betriebsstrategie

Mit der Flex-Fuel-Betriebsstrategie wurde eine Kraftstoffumschaltung bei identischer Hardwarekonfiguration angestrebt. Diese setzt voraus, dass der Motor mit beiden Kraftstoffsystemen eine vergleichbare Leistung ermöglicht und gleichzeitig die Emissionskonformität sichergestellt ist.

Im Rahmen der FuE-Arbeiten hat sich gezeigt, dass der ursprünglich angestrebte Flex-Fuel-Betrieb von Diesel und OME nicht zielführend ist. Der OME-Betrieb im erforderlichen Drehzahlbereich von 2.000-

3.000 1/min führt unter Einsatz von Serienkomponenten zu einer deutlichen Überschreitung des zulässigen Grenzwerts des Einspritzdrucks (vgl. Kapitel 1.1.2, Abb. 3).

Wie in Kapitel 1.1.4 (2) bereits dargestellt, lässt sich der Einspritzdruck durch den Einsatz von Injektoren mit größerem hydraulischem Durchfluss absenken. Dies bewirkt eine verkürzte Einspritzdauer und die damit gewünschte Absenkung des Einspritzdrucks (vgl. Abb. 9, Mitte). Jedoch führt die steigende Durchflussrate zu einer schlechteren Gemischaufbereitung und folglich deutlich erhöhten CO-Emissionen im Vergleich zum Serienmotor (betrieben mit herkömmlichem Dieseldieselkraftstoff). Die Ursache wird in einer ungünstigen Strahlführung gesehen, welche das Benetzen des Kolbens mit Kraftstoff verursacht. Eine Emissionskonformität Motorbetrieb mit Dieseldieselkraftstoff wäre in der Folge nicht mehr zu erreichen.

Aufgrund dieser Zielkonflikte zwischen der Senkung des Einspritzdrucks (OME-Betrieb) und der Emissionskonformität (Dieselbetrieb) ist ein Flex-Fuel-Konzept bei gleicher Hardwarekonfiguration nach aktuellem Stand in der Praxis nicht umsetzbar. Der limitierende Faktor sind in diesem Zusammenhang vor allem das Einspritzsystem und dessen Komponenten wie Hochdruckleitungen, Injektor und das Magnetventil zur Steuerung der Einspritzung. Um einen Flex-Fuel Ansatz darstellen zu können, bedarf es wie im Kapitel 1.1.2 bereits dargestellt eines deutlich komplexeren Common-Rail Einspritzsystems mit drehzahlunabhängiger Bereitstellung des Einspritzdrucks in Verbindung mit den Möglichkeiten der Mehrfacheinspritzungen. Die Änderungen betreffen die Kernkomponenten Hochdruckpumpe mit Zulaufsteuerung, ein Rail zur flexiblen Druckbereitstellung mit Hochdruckregelventil sowie einen Common-Rail Injektor. Die zu erwartenden Systemkosten sind in diesem kostensensitiven Segment jedoch wirtschaftlich nicht serienmäßig durchsetzbar. Zusätzlich würde sich sowohl die Systemkomplexität als auch der Kostenrahmen durch die notwendige Integration eines Mehrkammer-Tanksystems und durch die benötigten zusätzlichen Ventile und Steuerungskomponenten nochmals deutlich erhöhen.

Vor diesem Hintergrund wurde das Flex-Fuel-Konzept im Vorhaben nicht weiterverfolgt.

1.3 Digitalisierungsansatz zur geositionsabhängigen automatischen Umschaltung des Betriebsstoffes

Der angestrebte Digitalisierungsansatz hatte eine automatische, geositionsabhängige Umschaltung des Betriebsstoffes zwischen Diesel- und OME-Kraftstoff im Rahmen der Flex-Fuel-Betriebsstrategie zum Ziel. Im Rahmen des Vorhabens wurden die Voraussetzungen dafür geschaffen. Auch wenn die Fuel-Flex-Strategie wie unter 1.2 beschrieben nicht weiterverfolgt wurde, bietet die im Rahmen des Vorhabens geschaffene Infrastruktur und Datenbasis erstmals statistisch relevante Echtzeitzungsdaten von Antriebssystemen zu generieren und auszuwerten, die Aufschluss über das Nutzungsverhalten, das Nutzungsumfeld, die Einhaltung von Wartungs- und Serviceplänen sowie den „Motor-Gesundheitszustand“ im Bereich des „Light Equipment“ geben und auch den Maschinenherstellern häufig nicht zur Verfügung stehen. Die geschaffene Kommunikations- und Datenbasis liefert wertvolle Informationen für die strategische Ausrichtung der bei der Weiterentwicklung von Antriebstechnologien und leichter Arbeitsmaschinen und stellt eine wichtige Grundlage für weitere FuE-Arbeiten z. B. in den Bereichen vorausschauende Wartung und klimafreundliche Antriebssysteme dar.

Die Ergebnisse im Bereich der Digitalisierung umfassen Hard- und Softwarelösungsansätze inklusive der erforderlichen Schnittstellen, Kommunikationsprotokolle und Speicherinfrastruktur im Zusammenhang mit

- dem sicheren Datenaustausch zwischen Motorsteuergerät und LTE-Übertragungsmodul (Rohdaten);
- dem sicheren Datenaustausch zwischen LTE-Übertragungsmodul und cloudbasierter Client (Rohdaten);
- der Datenbereinigung, -analyse und -verarbeitung (Generierung von Informationen aus den Rohdaten).

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden Funktionsmustermodule entwickelt und im Feld erprobt. Dies reichte von der Gewährleistung des Datentransfers, über die intelligente Datenauswertung bis hin zur Geopositionierung mit darauf basierender Alarmierungsfunktion bei Verlassen eines definierten

Geopositionsareals. Die Feldtests zeigen, dass die entwickelten Module auch unter harten Umgebungsbedingungen (z. B. Baustelle) kontinuierlich und zuverlässig Motor- und Sensordaten liefern.

2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises stellen, wie gemäß Finanzierungsplan der Antragstellung erwartet, die Personalkosten dar, diese umfassten rd. 73 % der gesamten Selbstkosten des Vorhabens.

Die weiteren Kostenpositionen machten jeweils weniger als 10 % der gesamten Selbstkosten des Vorhabens, die höchsten Kosten unter diesen Positionen sind Materialkosten, Kosten für FE-Fremdleistungen und innerbetriebliche Leistungen.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeiten ergab sich aus den Vorgaben der Arbeitspakete und der Zielsetzung des Vorhabens. Im Rahmen der Zwischenberichte wurden die Ergebnisse jeweils detailliert dargestellt. Insbesondere da der Flex Fuel Ansatz mangels praktischer Umsetzbarkeit nicht weiterverfolgt wurde, sind die Kosten deutlich unter den beantragten Kosten geblieben.

Aus der Corona-Pandemie und den daraus resultierenden Folgen entstand das Erfordernis einer kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit um sechs Monate für das gesamte Verbundvorhaben NAMOSYN.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Zwar hat sich im Rahmen der FuE-Arbeiten gezeigt, dass der ursprünglich angestrebte Flex-Fuel Betrieb von Diesel und OME aufgrund des Zielkonflikts zwischen der Senkung des Einspritzdrucks (OME-Betrieb) und der Emissionskonformität (Dieselbetrieb) bei gleicher Hardwarekonfiguration nach aktuellem Stand in der Praxis nicht umsetzbar ist, jedoch wurden wichtige Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Grenzen des OME-Betriebs gewonnen, wie auch Emissionsreduzierungspotenziale untersucht. Die für den OME-Betrieb erforderlichen Umrüstmaßnahmen wurden identifiziert, geeignete Komponenten entwickelt und am Prüfstand erprobt. Auf diesen gewonnenen Erkenntnissen lässt sich in nachfolgende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aufsetzen und sie können grundsätzlich auf größere Industriedieselmotoren transferiert werden.

HATZ ist auf Basis der erzielten Projektergebnisse in der Lage dem Markt „saubere“ Verbrennungsmotoren unter Nutzung synthetischer Kraftstoffe anzubieten. Die aktuelle politische Debatte hinsichtlich dem EU-weit stufenweisen „Verbrenner AUS“ ab 2035 und damit im Zusammenhang auch synthetischen Kraftstoffen betrifft die für HATZ relevante Motorenklasse aktuell nicht direkt. Dennoch wird der Fortgang der politischen Debatte und die Reaktion des Marktes darauf entscheidend dafür sein, ob und in welcher Form synthetische Kraftstoffe eine Zukunft haben und die Vorhabensergebnisse am Markt verwertbar sind.

In der aktuellen Diskussion wird die Marktakzeptanz eines nicht Drop-In-fähigen synthetischen Kraftstoffes marktseitig als wenig vielversprechend bewertet. Grundsätzlich geht die Tendenz überwiegend in zwei unterschiedliche Richtungen: Zum einen werden Drop-In-fähige Kraftstoffe benötigt, um die Flotte existierender Geräte und Maschinen in die Defossilisierung mit einbeziehen zu können. Zum anderen veröffentlichen Motoren- und Fahrzeughersteller insbesondere größerer Leistungsklassen zunehmend Projekte, in denen intensiv mit Wasserstoff gearbeitet wird. Des Weiteren bildet Methanol ein vielversprechendes Plattform-Molekül.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf Basis der laufenden Markt- und Patentrecherchen ließen sich im Vorhabenszeitraum keine Anhaltspunkte erkennen, wonach das Teilvorhaben Gegenstand anderweitiger Forschungen und Entwicklungen ist bzw. bestehende Schutzrechte einer Ergebnisverwertung entgegenstehen könnten.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens erfolgten bereits zwei Veröffentlichungen:



-
- Stegmann, R: Diesel and beyond – technology driven evolution for future non-road powertrain solutions, High Altitude Emission Symposium HAES, April 6th, 2022, Ruka, Finland
 - Stegmann, R.: Oxymethylene Ethers: Application in Naturally-Aspirated, Off-Road Diesel Engines for Ultra-Low Emissions, 3rd International Workshop Perspectives on Power to Liquids and Power to Chemicals 2022, May 10th -11th, 2022 Freiburg

Weitere Veröffentlichungen sind aktuell nicht geplant, aber jederzeit insbesondere in Zusammenarbeit mit der OTH Regensburg jederzeit denkbar

.