Perfecting Energy Conversion

Your research partner for combustion engines and energy systems

Schlussbericht

TEME2030+

TECHNOLOGIEEVALUATION FÜR MARINEMOTOREN ZUR ERREICHUNG DER THG-ZIELE 2030 UND FOLGEND

REDUZIERUNG DER METHANEMISSIONEN VON DUAL-FUEL MOTOREN DURCH PRÄDIKTIVE THERMODYNAMISCHE MODELLE UND ABGASNACHBEHANDLUNGS-KONZEPTE

Forschungszentrum für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik Rostock GmbH

Förderkennzeichen: **03SX537E**

Projektträger: **Projektträger Jülich**

Laufzeit des Vorhabens: **01.04.2021 – 31.07.2025**

Zuwendungsempfänger: **Forschungszentrum für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik Rostock (FVTR) GmbH**

Autoren: **Dr.-Ing. Martin Theile**

M.Sc. Gunther Näther

Dr.-Ing. Robert Bank

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1 Kurze Darstellung der Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens 4
1.1 Aufgabenstellung 4
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 6
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens und Zusammenarbeit mit anderen Stellen 7
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 9
2 Eingehende Darstellung 10
2.1 Ergebnisse 10
2.2 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 47
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 47
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertung im Sinne des Verwertungsplans 48
2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 48
2.6 Erfolgte bzw. geplante Veröffentlichungen 49
3 Literaturverzeichnis 50
4 Danksagung 52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einzylinder Forschungsmotor-Prüfstand an der Universität Rostock 6
Abbildung 2: Modellgasprüfstand der FVTR GmbH 7
Abbildung 3: Darstellung der der Informationsflüsse bzw. Interaktion der Projektpartner untereinander 8
Abbildung 4: Berechneter Brennverlauf und Erdgasumsetzung bei der Verbrennung 11
Abbildung 5: DVA-Programmstruktur 12
Abbildung 6: Darstellung des 0D/1D Prozesssimulationsmodells des 1M34DF Forschungsmotors 13
Abbildung 7: Darstellung einer exemplarischen Korrelationsmatrix (Heatmap) 17
Abbildung 8: Methanschlupf: prozentuale Abweichungen eines linearen und hybriden Modells auf den Test-Betriebspunkten 18
Abbildung 9: Ausbreitung der Methanmasse im Brennraum nach der Eindüsung 20
Abbildung 10: Vergleich Messung vs. Modell: Methanemissionenen bei Variation des Methaneindüse-Timings im MD-Brennverfahren 21
Abbildung 11: Temperatur- und Restmethanmassenverlauf (in Kelvin bzw. kg) in der AVL Cruise M -Simulation 22

Abbildung 12: exemplarische Ein- und Ausgabegrößen der FMU in AVL Cruise M 22
Abbildung 13: Eingabegrößen der FMU in der GT-Power-Entwicklungsumgebung 23
Abbildung 14: übereinstimmende Ausgabe der FMU nach der Simulation in GT-Power und in Dymola 23
Abbildung 15: Emissions- und Wirkungsgradergebnisse bei 50%-Last-Simulation verschiedener Verdichtungsverhältnisse unter Schwerpunktlagevariation 25
Abbildung 16: Klopfintensität bei 50%-Last-Simulation bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen unter Schwerpunktlagevariation.....26
Abbildung 17: Alter (oben) und neuer (unten) Probenhalter Modellgas-Prüfstand 27
Abbildung 18: Katalysatorproben (li.) inkl. Canning (re.) 28
Abbildung 19: Prüfaufbau Modellgasprüfstand mit Gasdosier- und Mischeinheit (links), Ofen (rechts) und FT-IR-Spektrometer (vorn rechts).....28
Abbildung 20: Durch Projektpartner Umicore zur Verfügung gestellte Versuchskatalysatoren.....29
Abbildung 21: Katalysatorstein mit entnommenen Kernproben, Lagermatte und gecannter Probe 29
Abbildung 22: Vergleich Temperaturverläufe und CH_4-Umsatz Light off/out CH_4-Oxidation als Zeitverlauf 30
Abbildung 23: NO- und NO2-Konzentration verschiedener Light Off Tests sowie Gleichgewichtskonzentrationen aus theoretischer Berechnung 31
Abbildung 24: Methan-Oxidations-Vermögen von NO_2 32
Abbildung 25: Einfluss erhöhter NO_2-Konzentration auf Methanoxidation.....33
Abbildung 26: Alterungslauf MOC (CH_4 1.000 ppm, O_2 7,9 m.-%, CO_2 9,3 m.-%, H_2O 10 m.-%, N2 balance) und Light off / Light out (CH_4 1.000 ppm, O_2 7,9 m.-%, CO_2 9,3 m.-%, N_2 balance) 34
Abbildung 27: Vergleich Umsatz CH_4 Light off/out über mittlerer Probentemperatur 35
Abbildung 28: NO und NO_2-Konzentrationen als Zeitverlauf 36
Abbildung 29: Entwurf des neuen Cannings. 37
Abbildung 30: Brennraumtemperatur und normierter Summenbrennverlauf während der Verbrennung bei Variation der AGR-Rate.....40
Abbildung 31: Laminare Flammengeschwindigkeit bei unterschiedlichen AGR-Raten 40
Abbildung 32: Auswirkung der Abgasrückführung auf Stickoxidemissionen.....41
Abbildung 33: Darstellung des Brennverlaufs zweier Betriebspunkte bei 100% Last (oben) und 25% Last (unten) bei Variation des Wasserstoffanteils in Massenprozent und nahezu konstanter Schwerpunktlage. 42
Abbildung 34: Ergebnisse der Parametrierung des 0D/1D-Modells im MD-DI-Brennverfahren (rot: Simulation, grün: Experiment; jeweils 50% und 100% Last) 43

Abbildung 35: Testergebnisse des Methanschlupfmodells im MD-Betrieb bei früher Methaneindüsung [359 GradvZOT] 44
Abbildung 36: Verteilung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses im Brennraum in Abhängigkeit des Eindüse-Timings von relativ früh (320 ° vZoT) bis sehr spät (45° vZOT) als Ergebnis der 3D-CFD-Prozessrechnung 45
Abbildung 37: Heiz- und Druckverlauf eines exemplarischen Betriebspunktes im HD-Brennverfahren (rot: Simulation, grün: Experiment; 25% Last) 46

1 Kurze Darstellung der Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben TEME2030 beschäftigte sich mit der Potenzialbewertung von Technologiepaketen, welche insbesondere der Minderung von Methanemissionen an Dual-Fuel Marinemotoren dienen sollen. Dabei galt die sichere Einhaltung der bestehenden internationalen Stickoxidgrenzwerte nach IMO Tier III als Minimalanforderung. Betrachtet werden sollten dabei im Zentrum des Projektes drei unterschiedliche Brennverfahren, welche sich hinsichtlich des zur Anwendung kommenden Brenngasdruckes (Nieder-, Mittel- und Hochdruck) sowie der Position der Gaseindüsung (Einlasskanal- und Direkteinblasung) wesentlich voneinander unterscheiden. Als Basis wurde das aktuell etablierte ND-Verfahren zunächst hinsichtlich seiner Quellen der Methanemissionen untersucht, ehe am Versuchsträger die alternativen Verfahren appliziert wurden.

Das Gesamtziel des Vorhabens war damit eine reale, signifikante CO_2-Einsparung maritimer Antriebssysteme basierend auf der Dual-Fuel Technologie. Langfristig können die Ergebnisse in die Serienentwicklung von Dual-Fuel Motoren der nächsten Generation einfließen. Es wurden damit Grundlagen geschaffen, mit welchen motorischen Technologien maritime Antriebsanlagen ab 2030 in Serie ausgestattet werden können.

Das Gesamtziel einer Reduzierung der CO_2-Emissionen korreliert bei Dual-Fuel Motoren stark mit dem Methanschlupf. Um den theoretischen Vorteil einer 25%-igen Reduktion gegenüber dieselbetriebenen Anlagen auszuschöpfen, muss der Methanschlupf auf nahezu 0% reduziert werden. Technologische Konzepte sind:

- Reduktion im Abgastrakt durch einen Methanoxidationskatalysator,
- direkte Gaseinblasung, wodurch ein Überspülen des Methans im Ladungswechsel komplett verhindert wird,
- Brennverfahren mit Hochdruckgaseinblasung, wodurch Methanemissionen durch unverbranntes Methan nahezu vollständig reduziert werden.

Auf Grundlage thermodynamischer und statistischer Modelle und Methoden sowie programmtechnischer Werkzeuge sollten diese technologischen Konzepte analysiert, bewertet und verglichen werden. Dies schloss die Analyse experimenteller Daten des Versuchsträgers 1M34DF ein, sowie auch die motorische 0D/1D-Prozessrechnung zur Vorhersage des zu erwartenden Potentials der Methanreduktion für verschiedene motorische Betriebsbedingungen. Dafür wurde im Rahmen des Projektes ein thermodynamisches Methanschlupfmodell entwickelt, welches das Betriebsverhalten in ND, MD und HD Gaseinblasungskonzepten berücksichtigt. Um eine technologische Bewertung der nachmotorischen Methanreduktion vornehmen zu können, wurden

verschiedene Katalysatoren vom Projektpartner Umicore experimentell untersucht und bewertet. Das beantragte Projekt hatte daher eine hohe Relevanz für jetzige und zukünftige Motorgenerationen und konnte einen wesentlichen Beitrag zur globalen CO_2-Reduktion leisten.

Das Gesamtziel des Teilvorhabens seitens der FVTR GmbH war die Entwicklung von experimentellen Testmethoden und thermodynamischen Modellen zur Analyse und Vorhersage des Methanschlupfes von Dual-Fuel Brennverfahren und der Leistungsfähigkeit von Methankatalysatoren. Im Mittelpunkt der Entwicklung modernster thermodynamischer Simulationsmodelle stand ein numerisches Methanschlupfmodell zur Vorhersage der Auswirkungen unterschiedlicher zukünftiger Technologiepakete auf die Emissionen von Methan im Dual-Fuel Betrieb. Das entwickelte Modell wurde im geplanten Vorhaben als PlugIn Softwarepakete für den industriellen Einsatz in branchenüblichen Softwaretools entwickelt. Übliche Ansätze zur Berechnung der unverbrannten Kohlenwasserstoffe sind fast ausschließlich für Benzinmotoren entwickelt und erweitert worden. Aufgrund der gänzlich unterschiedlichen Motorengrößen und Kraftstoffeigenschaften sind diese Modelle nicht direkt auf Dual-Fuel Motoren überführbar. Modelle, welche explizit für Gasmotoren entwickelt wurden, konnten bisher nur für monovalente Brennverfahren mit Vorkammer und/oder Zündkerze validiert werden. Aufgrund der unterschiedlichen Betriebsweisen gegenüber dem Dual-Fuel Brennverfahren wurden diese Modelle in diesem Forschungsvorhaben neu evaluiert und angepasst. Insbesondere die Interaktion zweier Kraftstoffe, welche sich partiell mischen und anschließend reaktionskontrolliert zünden und verbrennen, steigern einerseits die Komplexität, andererseits die Notwendigkeit eines solchen Modells. Da die Prozesssimulation im Bereich der Vorentwicklung von Motoren eine sehr große Rolle spielt, ist es essenziell, dass sämtliche motorischen Kenngrößen, darunter auch die Emissionen, korrekt vorhergesagt werden können. Hier setzt das Teilvorhaben der FVTR GmbH an.

Mit Hilfe thermodynamischer Modelle der Druckverlaufsanalyse in Verbindung mit statistischen Methoden war es möglich, die Auswirkungen von Einzelmaßnahmen und Technologiekonzepten auf den Methanschlupf zu analysieren. Damit wurde ebenfalls das Verständnis der innermotorischen Dual-Fuel Verbrennung signifikant erhöht. Schlussendlich konnten damit in Verbindung mit den experimentellen Arbeiten der Projektpartner innermotorische Maßnahmen definiert werden, um den Methanschlupf zu reduzieren.

Da je nach Brennverfahren und Motorauslegung zukünftig ebenfalls eine nachmotorische Methanreduktion durch Katalysatoren möglich ist, plante die FVTR zusätzlich ihre experimentellen Forschungsanlagen auf die Analyse und Bewertung von Methankatalysatoren zu erweitern und so ein tiefgehendes Verständnis hochmoderner Abgasnachbehandlungskonzepte zur Reduzierung des Methanschlupfes zu erlangen. Die

Analyse von Katalysatorproben fand am Modellgasprüfstand der FVTR GmbH statt. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden ebenfalls motorische Untersuchungen am 1M34DF unterstützt.
Somit lag der Fokus des Forschungsanteils der FVTR klar in der Erarbeitung optimaler inner- und nachmotorischer Strategien zur Reduzierung der Methanemissionen, da diese aus Sicht der FVTR GmbH ein wesentlicher Treiber für Entwicklungsprozesse von Dual-Fuel Marinemotoren in der Zukunft sein werden. Um diesen Fragestellungen optimal begegnen zu können, wurde das simulative und experimentelle Portfolio der FVTR im hier vorliegenden Vorhaben entsprechend erweitert.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Innerhalb der FVTR GmbH gibt es eine jahrelange Erfahrung bzgl. der thermodynamischen Analyse und Simulation von innermotorischen Verbrennungsabläufen. Im Rahmen des Einzelvorhabens der FVTR GmbH kamen als Programmiersprache „Python“ zum Einsatz, um so eine flexible Umgebung zur Integration weiterer Modelle zu generieren. Die 0D/1D-Simualation geschah mit Hilfe der kommerziellen Software „AVL-Cruise-M“ aus dem Hause „AVL“. Diese Software ist bei Motorenherstellern weltweit sehr verbreitet. Der motorische Versuchsträger, welcher mit dem Einzelvorhaben verknüpft ist, ist ein Forschungsmotor des LKV der Universität Rostock. Dieser Motor ist als 1-Zylinder-Forschungsmotor ausgeführt und basiert auf einem Aggregat des ehemaligen Motorenherstellers Caterpillar Motoren GmbH und Co. KG.

1M34DF Forschungsmotor	
Bohrung	340 mm
Hub	460 mm
Nennleistung	> 500 kW
Nenndrehzahl	720 1/
Spitzendruck	> 200 bar

Abbildung 1: Einzylinder Forschungsmotor-Prüfstand an der Universität Rostock

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde ein Modellgasprüfstand genutzt und im Rahmen des Vorhabens erweitert.

Abbildung 2: Modellgasprüfstand der FVTR GmbH

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeitspakete der FVTR GmbH innerhalb des Verbundprojektes wurden in enger Zusammenarbeit insbesondere mit dem Projektpartner Universität Rostock bearbeitet. Die nachfolgenden Übersichten stellen daher die seitens FVTR geleisteten und gestellten Zuarbeiten zusammenfassend dar.

Tabelle 1: Geleistete Zuarbeit für die FVTR GmbH

Projektpartner	**Geleistete Vorarbeiten für die FVTR GmbH**
LKV, Universität Rostock	▪ Generierung von experimentellen Daten zur thermodynamischen Analyse ▪ Generierung von Validierungsdaten für die entwickelten thermodynamischen Modelle
UMICORE	▪ Zur Verfügung stellen unterschiedlicher Katalysatormaterialien

Tabelle 2: Geleistete Arbeiten der FVTR GmbH für Projektpartner

Projektpartner	Nutzung der Arbeiten von der FVTR GmbH
LKV, Universität Rostock	▪ Thermodynamische Auswertung der experimentellen Daten des CH4-Forschungsmotors
UMICORE	▪ Analyse des Betriebsverhaltens von Methan-Oxidationskatalysatoren am Modellgasprüfstand

Damit ergibt sich insgesamt ein Arbeitsablauf, welcher durch eine starke Interaktion der Projektpartner, insbesondere auch der assoziierten Partner, untereinander gekennzeichnet ist und sich schematisch wie folgt vereinfacht darstellen lässt.

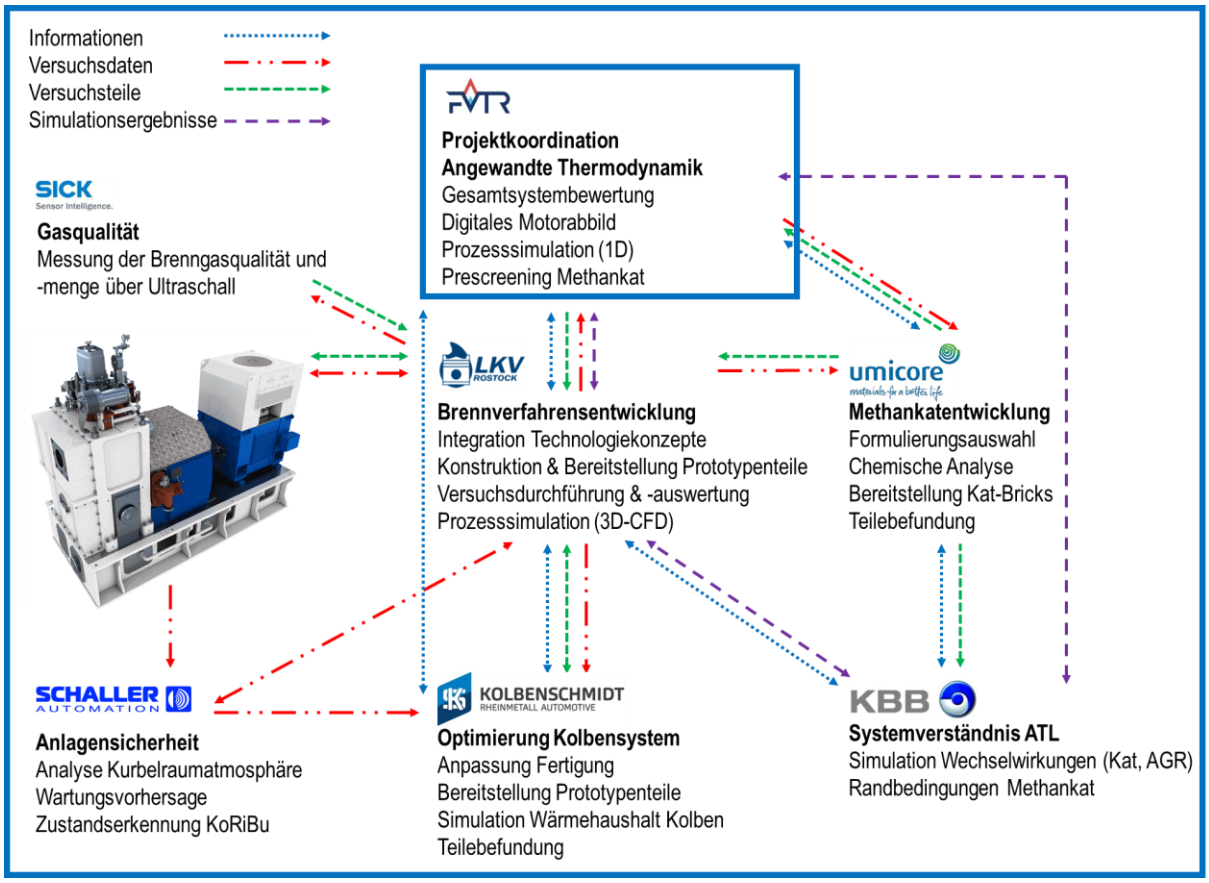

Abbildung 3: Darstellung der der Informationsflüsse bzw. Interaktion der Projektpartner untereinander

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die thermodynamische Analyse des Motorinnenprozesses geschieht in der Regel durch die Auswertung des gemessenen Innenzylinderdruckes im Brennraum unter Zunahme zusätzlicher sekundärer Messgrößen (z.B. Ansaugluftdruck und -temperatur). Mit Hilfe von Erhaltungssätzen von Masse, Impuls, Energie und Spezies sowie der kalorischen und thermischen Zustandsgleichungen der Mischung im Brennraum wird dann der Energieumsatz berechnet. Zusätzliche Teilmodelle zur Berücksichtigung des Wärmeüberganges an Zylinderkopf, Laufbuchse und Kolben sowie eine Unterteilung des Brennraums in mehrere thermodynamische Zonen erhöhen dabei die Genauigkeit. Bei Brennverfahren mit direkter Kraftstoffeinbringung in den Brennraum sind Informationen über Beginn und Verlauf der Einbringung notwendig, um dann über weitere Modelle, basierend auf Strahlausbreitungsgesetzmäßigkeiten, eine Kraftstoffverteilung im Brennraum zu berechnen. Bei Dual-Fuel Brennverfahren ist dies eine wesentliche Kenngröße, um im Verbrennungsprozess über Teilmodelle (z.B. Ansatz nach Ünal et al. [1]) den Anteil des jeweiligen Kraftstoffes an der Verbrennung zu ermitteln.

Auf Basis solch detaillierter Modelle ist dann über empirische Modellansätze (z.B. Herleitung Turbulenzniveau, Grenzschichten, etc.) eine Aussage über das Flammenverhalten möglich, wodurch auf die Emissionen unverbrannten Methans geschlossen werden kann (z.B. [2]). Ein ganzheitlicher Ansatz für Dual-Fuel Motoren unter Berücksichtigung sämtlicher, notwendiger Teilprozesse ist derzeit weder in kommerziellen Softwareprogrammen noch in der wissenschaftlichen Literatur verfügbar. Es ist somit nicht bekannt, dass Methanschlupfmodelle für Dual-Fuel Motoren entwickelt wurden. Bis dato entwickelte Modelle für ottomotorische Brennverfahren lassen zuverlässige Vorhersagen in einem breiten Betriebsbereich derzeit nicht zu.

Statistische Auswertungen und Anwendung von Methoden aus der Signalanalyse (z.B. Wavelet-Analyse) zur Bildung von Korrelationen zwischen verschiedenen motorischen Betriebsbedingungen, experimentellen Daten und Emissionen ist bereits Stand der Technik. Neuartig ist die Anwendung neuronaler Netze zur Erkennung von Abhängigkeiten zwischen Prozessparametern oder zur Abbildung ganzer Teilprozesse. Hier ist die FVTR GmbH bereits im Bereich der Analyse energetischer Systeme tätig (siehe [3]). Eine Verknüpfung thermodynamischer und statistischer Methoden zur Analyse maritimer Dual-Fuel Brennverfahren ist derzeit nicht Stand der Technik. Es sind erste wissenschaftliche Arbeiten verfügbar, welche jedoch nicht auf maritime Anwendungen (d.h. LNG-Diesel Brennverfahren, hohe Ladedrücke, AGR) angewandt wurden (siehe [4]).

Hinsichtlich des Stands der Technik bei Methanoxidationskatalysatoren kann gesagt werden, dass nach der Katalysatormaterialentwicklung vorgeschaltet zu motorischen

Versuchen in der Regel eine Analyse des Betriebsverhaltens an so genannten Modellgasprüfständen stattfindet. Dabei können genaue Mischungen von typisch im motorischen Abgas enthaltenen Einzelkomponenten (z.B. N2, O2, CO2, H2O, CO, NO, NO2, CH4, C3H8, THCs, etc.) eingestellt und auf verschiedenen Temperaturniveaus einer Katalysatorprobe zugefügt werden. Die Probe befindet sich in einer isothermen Zone in einem thermisch geregelten Ofen. Um realitätsnahe Betriebszustände abzubilden, kann ein Teil des Systems unter Druck gesetzt werden, um eine Vor- oder Zwischenturbinenanwendung im Motor abzubilden. Modellgasprüfstände dieser Art sind maßgeschneiderte Sonderlösungen. Die FVTR GmbH hat in der Vergangenheit ihren Modellgasprüfstand für eine solche Anwendung ertüchtigt (siehe [5]). Unbekannt und nicht Stand der Technik sind die Katalysatormaterialien sowie die motorische Umsetzung (Größe, Einbaulage, Regerationsstrategien). Erste Forschungsergebnisse sind veröffentlicht (siehe [6]), zeigen jedoch deutlich, dass Optimierungspotential vorhanden ist und Detailfragen des zu beschreitenden Technologiepfades noch offen sind. Insbesondere der katalysatormaterialspezifische Einfluss gezielt zudosierter unverbrannter Kohlenwasserstoffe aus dem Pilotkraftstoff auf das Regenerationsverhalten ist unbekannt und Untersuchungen daher zwingend erforderlich. Für Details zur Katalysatortechnologie sei auf die Einzelvorhabensbeschreibung vom Partner Umicore verwiesen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisse

AP 1 Vorbereitung Anpassung Versuchsträger, Prüfstand und Medienversorgung

AP 1.3 Update & Abgleich der Auswertetools und -algorithmen im Projektverbund

Zur Auswertung der im Projektverbund geplanten Messkampagnen wurde das hauseigene Druckverlaufsanalyse-Tool der FVTR GmbH modularisiert und wesentlich erweitert und somit auf den Stand der Zeit gebracht.

Neben den bisher implementierten konventionellen Kraftstoffen, lediglich definiert durch ihr C:H-Verhältnis, ist nun auch die Eingabe einer detaillierten Brennstoffzusammensetzung möglich (Brennstoffvektor). Erdgas wird hierbei als 6-Komponentengemisch aus Methan, Ethan und Propan, sowie Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoffdioxid betrachtet.

Unter Berücksichtigung dieser Brenngaszusammensetzung werden die thermodynamischen Stoffeigenschaften der jeweiligen Komponenten im Verbrennungsprozess ermittelt. Hierzu wurde ein NASA-Polynom-Ansatz implementiert, mittels dessen Enthalpien und spezifische

Wärmekapazitäten der einzelnen Komponenten temperaturabhängig bestimmt werden können:

$$\frac{c_p}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4$$

$$\frac{h}{RT} = a_1 + a_2 \frac{T}{2} + a_3 \frac{T^2}{3} + a_4 \frac{T^3}{4} + a_5 \frac{T^4}{5} + a_6 \frac{1}{T}$$

Die Polynomkoeffizienten a_i sind für viele Stoffe in der Literatur verfügbar. Über Mischungsregeln lassen sich hiermit unter Berücksichtigung der Ladungszusammensetzung die thermodynamischen Eigenschaften der Ladung bestimmen. Eine gute Vorhersage der Enthalpie und der spezifischen Wärmekapazität ist essentiell für die Berechnung des Brennverlaufs, da auf Grund der komplexen Betriebsregime im Projekt (halb-)empirische Ansätze (z.B. nach Zacharias) nicht zielführend sind.

Zusätzlich wurde der Brennstoffvektor um Wasserstoff ergänzt. Die thermodynamischen Stoffeigenschaften von Wasserstoff im Brennraum werden hierbei zum einen direkt über oben beschriebene NASA-Polynome berücksichtigt, zum anderen erhöht der eingebrachte Wasserstoff den H-Anteil im Brennstoffgemisch und wirkt sich so auch indirekt (Reaktionsgleichung) auf die modellierte Verbrennung aus.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft einen berechneten Brennverlauf sowie die Speziesbilanzen von Methan, Ethan und Propan bei der Verbrennung von Erdgas.

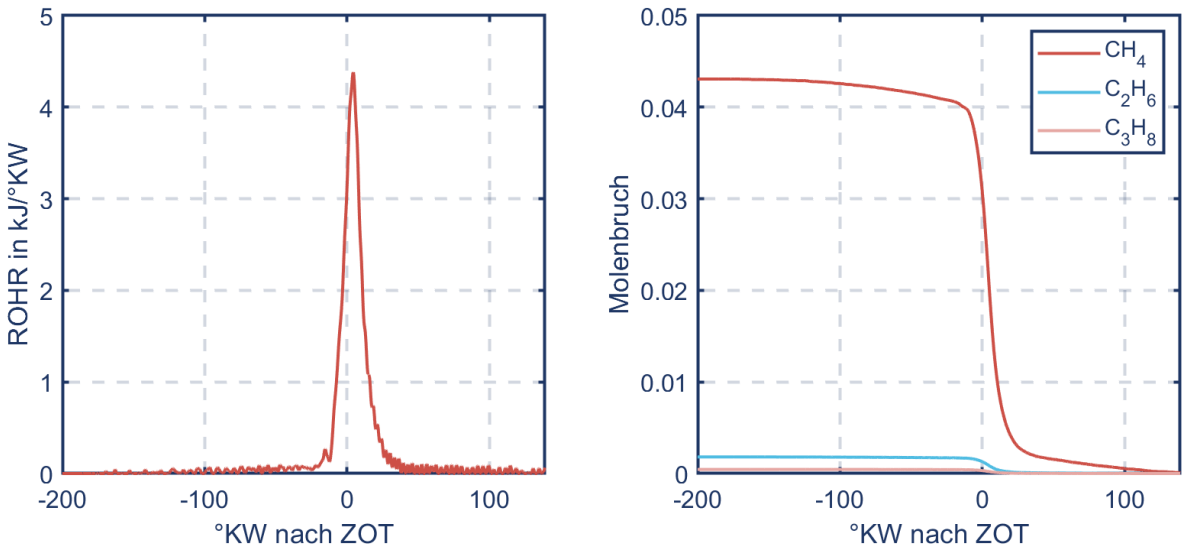

Abbildung 4: Berechneter Brennverlauf und Erdgasumsetzung bei der Verbrennung

Durch den modularen Aufbau des Brennstoffvektors gekoppelt mit dem NASA-Polynom-Ansatz ist es zukünftig komfortabel möglich diesen Vektor um weitere – neuartige - Brennstoffe zu erweitern. Auch die geplante DI-Gaseinblasung kann thermodynamisch über diesen Ansatz abgebildet werden. Für eine detaillierte Modellierung des Einflusses der

Gaseinblasung auf den Brennverlauf werden jedoch zunächst entsprechende Messdaten zur Validierung benötigt. Die Rahmenbedingungen zur Einbettung des Modells wurden aber bereits geschaffen.
Des Weiteren wurde ein Modell zur Berücksichtigung einer frei wählbaren Abgasrückführungsrate ergänzt. Die AGR wird in allen modellierten Bilanzen (Massen-, Spezies-, Energiebilanz) berücksichtigt.

Neben den Modell-Upgrades wurden zudem das User-Interface sowie die gesamte Programmstruktur neu aufgesetzt. Abbildung 5 zeigt Datentransfer, -verarbeitung und -auswertung des DVA Tools. Durch die modulare Umsetzung ist eine Erweiterung um andere Modelle und Motoren einfach integrierbar. Die Konvertierung der Motordaten wird durch im Hintergrund ablaufende Subprozesse realisiert, die einzelnen Module werden nach der Initialisierung automatisch in einem Hauptprogramm aufgerufen. Dies erhöht nicht nur die Nutzerfreundlichkeit, sondern ermöglicht auch eine automatisierte Analyse vieler Betriebspunkte. Diese bildet die Grundlage der geplanten statistischen Versuchsauswertung.

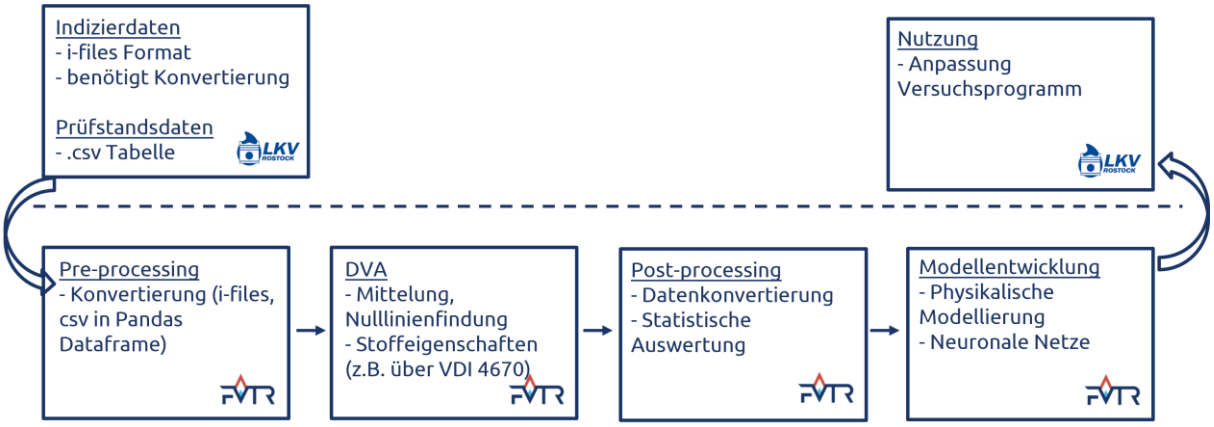

Abbildung 5: DVA-Programmstruktur

AP 2 Grundlagenentwicklung Simulation der DI-Gasbrennverfahren

AP 2.1 Entwicklung von Auslegungs- und Auswertungstools zur Unterstützung der Prüfstandsuntersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen der einzelnen Technologiepakete sowie der Unterstützung der Brennverfahrensentwicklung am 1M34DF Forschungsmotor des Projektpartners LKV wurde eine Erweiterung eines bereits vorhandenen 0D/1D Prozesssimulationsmodells durchgeführt. Insbesondere wurden die Besonderheiten der einzelnen Technologiepakete berücksichtigt. Im Zuge des Arbeitspaketes wurden verschiedene Bestandteile implementiert. Dies geschah in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner LKV. Im Folgenden wird nun detailliert auf die einzelnen Erweiterungen eingegangen.

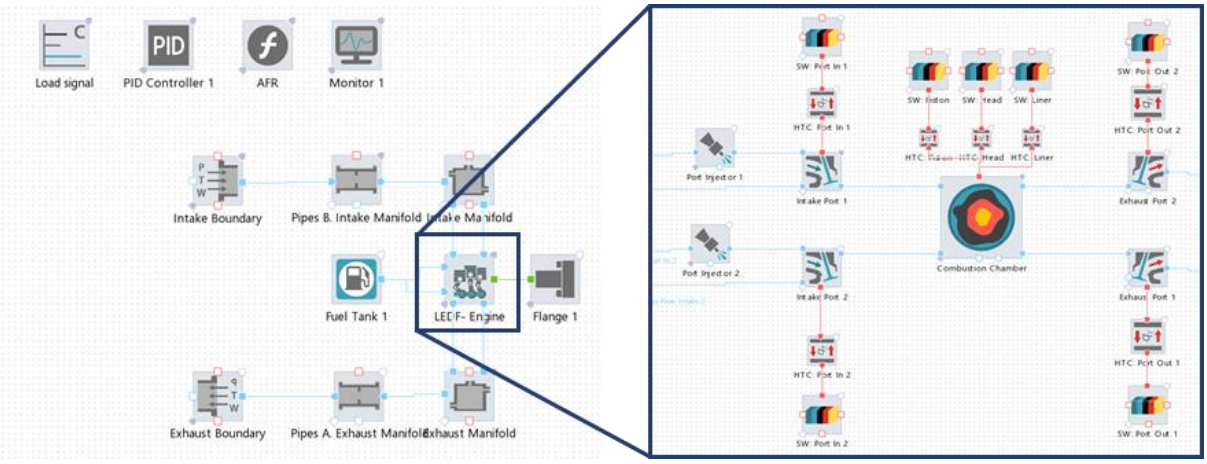

Abbildung 6: Darstellung des 0D/1D Prozesssimulationsmodells des 1M34DF Forschungsmotors

Abgasturboaufladung: Um eine höhere Leistungsausbeute zu realisieren bzw. bei Anwendung extremer Miller-Steuerzeiten eine bestimmte Leistungsdichte darstellen zu können musste die Abgasturboaufladung angepasst werden. Zunächst sollte dies mit Hilfe einer neuen einstufigen Aufladung durch die Daten eines Turboladers des Partners KBB geschehen. Hierzu wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner LKV die genauen motorischen Spezifikationen dem Partner KBB zur Verfügung gestellt, sodass eine geeignete Kombination aus Verdichter und Turbine identifiziert werden konnte. Die Kenngrößen wurden analysiert und in Zusammenarbeit mit dem LKV in das Modell in Form einer Kennlinie implementiert. Im Falle einer zweistufigen Aufladung kann der gleiche Arbeitsablauf genutzt werden, sodass eine effiziente Implementierung erfolgen kann. Details der erarbeiteten Kennlinie sind im Zwischenbericht des LKV zu finden.
Die 2-stufige Aufladung kann über eine nutzerspezifische Formel eingefügt werden. Der analytische Zusammenhang wird durch Zuarbeit der Turboladerkennlinien und entsprechende Werte für Lade- und Abgasgegendrücke vom Projektpartner KBB ausgearbeitet. Die Implementierung bzw. Nutzung der neuen Kennlinien im Modell erfolgt in Abstimmung mit dem LKV und den experimentellen Untersuchungen.

Variable Ventilsteuerzeiten / Ventilhubkurven: Die Implementierung erweiterter Ventilsteuerzeiten, die Validierung der Modelle sowie die Interpretation der Ergebnisse. geschah in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner LKV. Insbesondere wurden Kennfelder und funktionale Zusammenhänge erarbeitet, um verschiedene Nockenprofile und die Flexibilitäten des am Prüfstand befindlichen Flexible Camshaft Technologie (FCT) Systems abzubilden.

Abgasrückführung: Abgasrückführung; kurz AGR (engl. Exhaust Gas Recirculation) beschreibt die Rückführung von Abgasen zurück in den Verbrennungszyklus. Aufgrund der hierdurch bewirkten Veränderung der Zusammensetzung des eingebrachten Luft-Kraftstoff-Gemisches findet eine kühlere Verbrennung im Brennraum des Motors statt, wodurch die Entstehung von Stickoxiden gehemmt wird. Dieser Zusammenhang lässt sich mit dem Zeldovich-Mechanismus [10] beschreiben. Aufgrund des in der angesaugten Frischluft enthaltenen Stickstoffs, welcher zur Oxidation eine hohe Aktivierungsenergie benötigt kommt es bei geringeren Brennraumtemperaturen zu deutlich geringeren NOx-Emissionen.

Allerdings führen hohe Abgasrückführungsraten zu einer größeren Rußpartikelbildung bzw. unvollständiger Verbrennung und damit zur Emission unverbrannter Kohlenwasserstoffe. Damit besteht ein Zielkonflikt bezüglich umweltschädlicher Emissionen. Weiterhin wirken sich zu hohe AGR-Raten negativ auf die Motorleistung (Wirkungsgradminderung) aus.

Je nach Entnahmeort des Abgases unterscheidet man zwischen interner und externer AGR. Bei interner AGR wird durch eine Nockenwellen-Verstellung bewirkt, dass das Auslassventil während der Ansaugphase zeitweise geöffnet ist, sodass ein Teil des Abgases direkt wieder zurück in den Brennraum gesaugt wird. Im Gegensatz hierzu wird das Abgas bei externer AGR vom Abgastrakt über eine zusätzliche Strecke mit einem Ventil in den Einlasskanal zurückgeführt. Durch zusätzliches Kühlen des Abgases vor der Rückführung lassen sich die oben beschriebenen Effekte des Systems verstärken.

Beim Dieselbetrieb besteht bereits ein Trade-Off zwischen zwei gegenläufige Emissionen sowie Motorleistungen. Betrachtet man Dual-Fuel Brennverfahren (Diesel – Methan) so kommt mit dem Methanschlupf eine weitere Zielgröße hinzu, die es gilt gegenüber den anderen auszubalancieren.

Im Rahmen der Untersuchungen des Einflusses verschiedener Technologiepakete auf die Methanemissionen sind auf Seiten des Projektpartners LKV Entwicklungs-, Planungs- und Umsetzungsarbeiten einer Abgasrückführstrecke (AGR-Strecke) durchgeführt worden. Details können dem Schlussbericht des LKV entnommen werden. Um die Auswirkungen unterschiedlicher AGR-Raten auf die innermotorische Verbrennung und damit die Emissionsbildung (insbesondere Methanemission) im Voraus zu analysieren, wurde das 0D/1D Modell um die Möglichkeit der AGR erweitert. Folgende Ansprüche an eine AGR-Integration in das Modell standen im Vordergrund:

- Berücksichtigung von AGR über Einzelspezies (H_2O, CO_2, O_2, etc.)
- Auswirkungen von AGR auf die Verbrennung (z.B. laminare Flammengeschwindigkeit) müssen abgebildet werden

- Berücksichtigung der AGR-Zusammensetzung durch das in dem Moment verfügbare Abgas, d.h. es wird keine AGR-Zusammensetzung definiert, sondern eine AGR-Rate und die Zusammensetzung ergibt sich während der Prozesssimulation

Der Detailgrad der Abbildung der AGR-Strecke im Modell wurde zusammen mit dem Projektpartner LKV diskutiert. Die genaue Abbildung der AGR-Strecke, d.h. inklusive der genauen Verrohrung, Regelklappen, Verdichter inkl. Kennlinien, Kühler, etc., hat keine Vorteile als Folge. Da stationäre Betriebszustände analysiert werden, ist es hinreichend genau, wenn die AGR-Rate als Input in das Simulationsmodell genutzt wird. Da der Fokus der Untersuchungen auf den Auswirkungen der AGR auf das Brennverfahren sowie den Emissionen lag, wurde auf eine Modellierung des AGR-Strecke inkl. Gebläse verzichtet. Stattdessen wurde die Zusammensetzung im Luftpfad auf die entsprechenden Komponenten erweitert.

Kraftstoffzusammensetzung: Aufgrund der Nutzung von Wasserstoff wurde eine Überarbeitung der Kraftstoffdefinition in Zusammenarbeit mit dem LKV durchgeführt. Statt der Definition eines Kraftstoffes „Erdgas“ mit entsprechenden mittleren Gaseigenschaften (Heizwert, Dichte, etc.) wird, ähnlich wie beim DVA-Tool, ein Brennstoffvektor definiert, welcher die wesentlichen Gase als Reinstoffe enthält (Methan, Ethan, Propan, Butan), sowie Wasserstoff. Dies bietet insbesondere bei Parametervariationen einen deutlichen Vorteil.

Regelung: In Zusammenarbeit mit dem LKV wurden die einzelnen Regelungen innerhalb des Modells deutlich optimiert. Insbesondere ist es nun möglich, wie am 1M34DF Forschungsmotor, jeweils nach Last, Luft-Kraftstoffverhältnis und Verbrennungsschwerpunktlage zu regeln. Die Implementierung an sich geschah zum Großteil beim LKV. Die FVTR unterstützte hier jedoch im Rahmen der Verknüpfung einzelner Regelgrößen und -strecken aufgrund des Knowhows aus dem Fachbereich der Systemsimulation.

MD/HD-Gaseinblasung: Um eine hohe Validität des Methanschlupfmodells für den Dual-Fuel-Betrieb des Motormodells des 1M34DF-1-Zylinder-Motors bei verschiedener Gaseinblasung (ND, MD, HD) zu gewährleisten war es notwendig die sich herbei grundsätzlich unterscheidenden Brennverfahren (vorgemischt vs. diffusionskontrolliert) möglichst exakt in das bestehende Modell zu integrieren. Hierzu wurde das aktuelle Motormodell mit ND-Brennverfahren durch zusätzliche Kraftstofftank- sowie Injektorkomponenten zur Direkteindüsung von Methan-/Dieselkraftstoff erweitert. Die hinzugefügten Komponenten wurden realitätsgetreu mit den bereits vorhandenen

Motorbestandteilen als auch Parametern (z.B. Kraftstoffmassenanteile u. Eindüsezeitraum) verknüpft. Durch ein Umschalten einer „Layer Configuration“ aktivieren sich im 0D/1D-Modell die für die jeweils ausgewählte Einblasestrategie relevanten Komponenten. Dies ermöglicht eine flexible Handhabung des Simulationsmodells. Die von Seiten des LKV entwickelte Strategien für das MD/HD-Verfahren mit deutlich späteren und verkürzten Eindüsezeiten des Methankraftstoffes lieferten sowohl auf Mess- (LKV) als auch auf Simulationsseite (FVTR) plausible Brennverläufe zur Bewertung der jeweiligen Verfahren.

Verbrennungs- und Emissionsmodelle:
Unter anderem wurde der Luftpfad vor und nach Brennraum mittels 1-dimensionaler Bauteile abgebildet. Dies war insbesondere für AP 2.2.1 notwendig, da die Überstromverluste im ND-Verfahren dadurch korrekt dargestellt werden können. Eine detaillierte Beschreibung ist daher in AP 2.2.1 zu finden. Zudem wurden verbrennungsrelevante Parameter (z.B. Turbulenzparameter) im Modell durch Abgleich von Druck- und Brennverläufen (Simulation vs. Experiment) angepasst.

Variable Verdichtung: Die Variable Verdichtung wurde über eine Parametervariation des Verdichtungsverhältnisses abgebildet. Eine detaillierte Beschreibung ist in AP 5.1.3 zu finden.

AP 2.2 Entwicklung eines Methanschlupfmodells für Dual-Fuel Gasmotoren

Der erste Schritt zur Modellierung des Methanschlupfes bestand in einer umfassenden Analyse der bereits vorhandenen Messdaten des Versuchsträgers des LKV mit dem Ziel diejenigen Betriebsparameter zu identifizieren, die einen starken Zusammenhang zu den Methanemissionen aufweisen. Hier wurden unter anderem statistische Methoden eingesetzt, um Korrelationen zwischen motorischen Betriebsparametern w.z.B. Eindüse-Timings, Kraftstoffzusammensetzungen, eingestellte Drücke, Ventilhubkurven und den Methanemissionen als auch Interkorrelationen zwischen diesen Betriebsparametern untereinander zu identifizieren.
Dabei konnte festgestellt werden, dass viele Betriebsgrößen im Zusammenhang mit dem Methanschlupf stehen und diese Betriebsparameter auch untereinander hoch korreliert sind. Gleichzeitig lassen sich die Ergebnisse nicht zu, dass man eine kleine Menge an Parametern für die Vorhersage der Emissionen auswählen kann, da jede einzelne zu wenig Aussagekraft diesbezüglich besitzt (relativ kleine Korrelationen).
Dies lässt auf ein hohes Maß an Komplexität der physikalischen Zusammenhänge schließen, weswegen im ersten Schritt ein Emissionsmodell auf Basis eines künstlichen neuronalen Netzes entwickelt wurde.

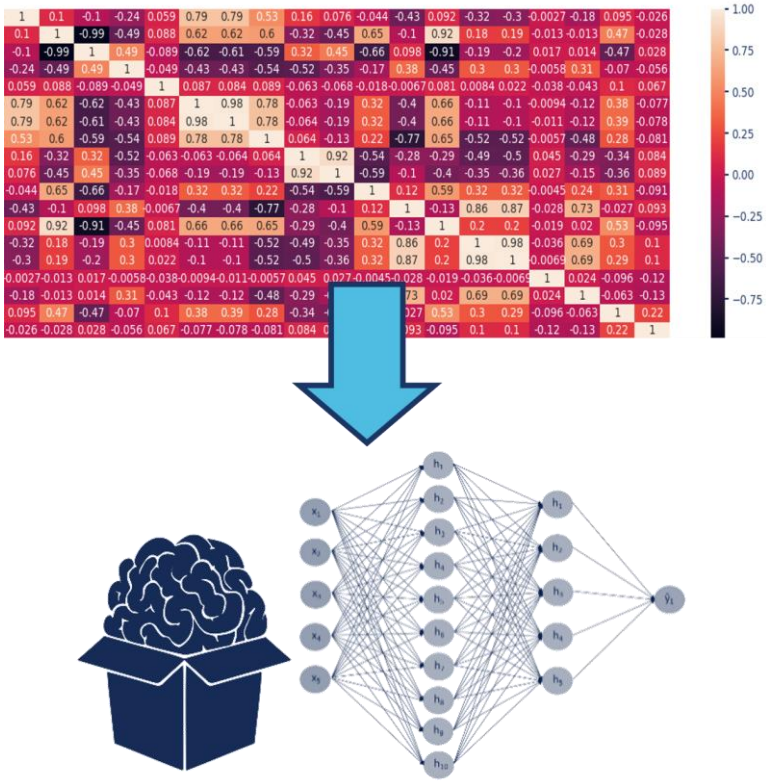

Abbildung 7: Darstellung einer exemplarischen Korrelationsmatrix (Heatmap)

Die Performance eines neuronalen Netzes hängt u.a. von dessen Größe bzw. Struktur ab; so können veränderte Netzeigenschaften (Hyperparameter) maßgeblich zur Verbesserung der Vorhersagegüte beitragen. Zur Findung einer möglichst geeigneten neuronalen Netzstruktur, d.h. Anzahl verdeckter Schichten, Neuronenanzahl je Schicht, Aktivierungsfunktionen, Optimierer etc. wurde eine automatisierte Hyperparametersuche durchgeführt. Das frei verfügbare Python-Framework „Optuna“ ermöglichte dabei eine effiziente Optimierung der Architektur des Netzes.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Vorhersageabweichungen (prozentual) eines linearen Modells im Vergleich zum entwickelten neuronalen Modellansatz. Zur besseren Bewertung dieses Resultats ist zudem der Median sowie das 5%- und 95%-Quantil der Methanschlupf-Messwerte des jeweiligen Betriebspunktes dargestellt. Somit befinden sich 90% der betrachteten Messwerte innerhalb des dargestellten Whiskers (Antennen).

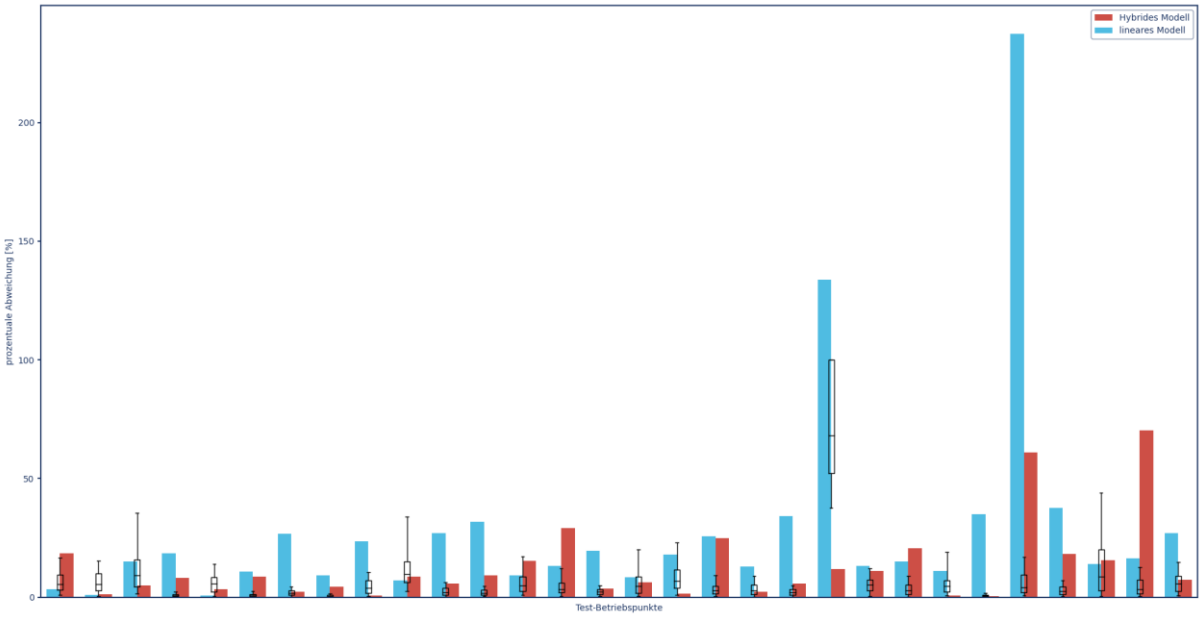

Abbildung 8: Methanschlupf: prozentuale Abweichungen eines linearen und hybriden Modells auf den Test-Betriebspunkten

Insgesamt lässt sich in dieser Darstellung die oben bezifferte Verbesserung der Vorhersagekraft der Methan-Emissionen durch den Einsatz eines neuronalen Netzes erkennen, wenngleich bei wenigen Test-Betriebspunkten durch das Netz eine merkliche Vergrößerung des Fehlers zu bemerken ist. Solche Vorhersagefehler sind auf eine zu geringe Extrapolationsfähigkeit des Modells zurückzuführen, d.h. das Netz ist gut darauf trainiert Methanemissionswerte für gewisse Betriebsparameter vorherzusagen, bekommt es aber deutlich veränderte Einstellungen, ist es nicht mehr in der Lage plausible Ergebnisse zu erzeugen. Genau diese Extrapolationsfähigkeit ist aber Grundlage dafür aussagekräftige Vorabanalysen durchführen zu können, wenn es darum geht neue Betriebsstrategien am Forschungsmotor durchzuführen.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde im Folgenden Teilphänomene der Entstehung des Methanschlupfes mittels physikalisch-basierter Modelle abgebildet. Gemäß [1] verbleibt unverbranntes Methan im Abgas größtenteils aufgrund folgender Phänomene:

1. Crevice mechanism
2. Short Circuiting
3. Partial Burning (Flame Quenching)

Die Entwicklung von Submodellen im 0D/1D-Modell dieser Phänomene erfolgte daher wie folgt:

Crevice mechanism: Die durch den Spalt zwischen Kolben und Laufbuchse oberhalb der Kolbenringe verursachten Emissionen wurden mittels eines Ansatzes basierend auf dem Idealen Gasgesetz abgebildet. Dazu wird ein anhand der Zylindermaße berechnetes Spaltvolumen bestimmt. Die Berechnung der Spalt-Methanmasse im PFI-Modus erfolgt unter der Annahme, dass im Spalt nahezu gleiche Druck-, Temperatur- und Luft-Kraftstoff-Verhältnisse herrschen wie im Brennraum. Diese Annahme ist im ND - Verfahren naheliegend, da wir hier von einer nahezu vollständigen Homogenisierung ausgehen können. Im MD- bzw. HD- Verfahren mit direkter (und später) Eindüsung des Kraftstoffes ist davon auszugehen, dass sich der Kraftstoff vor Brennbeginn fast vollständig im Zentrum des Zylinders (Brennzone) befindet, sodass weniger bis quasi keinen Methanschlupf durch Spalt Mechanismen erwartet wird.

Short-Circuiting: Um die sich aus der Ventilüberschneidung ergebenen Überstromeffekte und die daraus resultierenden Emissionen vorhersagen zu können, wurde der Gaspfad inklusive Ein- und Auslasstrakt des 1-Zylinder-Motors näherungsweise 1-dimensional nachgebildet. Sofern die anderen Emissionsphänomene gesondert als Submodelle berechnet werden, also nicht Teil der Massenbilanz im Motormodell sind, lässt sich die Menge an unverbrannten Methan durch das Short-Circuiting durch Integration des Methanmassenstroms (bei positivem Spülgefälle) im Abgasstrang ermitteln.

Partial-Burning (Flame Quenching): Die nach Berücksichtigung der beiden bereits erläuterten Phänomene bestehende Abweichung zwischen den Emissionen der Simulation und den Messungen am Prüfstand wird auf den Effekt zurückgeführt, dass die eingedüste Kraftstoffmasse aufgrund von zu niedrigen Temperaturen in etwaigen Randzonen (Wand…) oder lokal ungünstigen Mischbedingungen während der Brenndauer nicht vollständig verbrennt. Im ersten Schritt wurde versucht diesen Anteil des Methanschlupfes mittels bereits bestehender semiempirischer Ansätze w.z.B. Quenching Diameter abzubilden. Solche als auch hybride Modelle lieferten aber nur unzureichend genaue Ergebnisse, weshalb ein neuartiges Modell basierend auf einer Differentialgleichung mit einer PCA (Priciple Component Analysis) gekoppelt, entwickelt wurde. Mittels dieses Ansatzes konnte für das ND-Verfahren der Methanschlupf abgebildet werden.
Für das MD- bzw. HD-Verfahren konnte diese Methode jedoch nicht unverändert übernommen werden, da das 0D-1D-Simulationsmodell aufgrund eingeschränkter Dimensionalität die komplexe Gemischbildung vor Verbrennungsstart, die sich bei Direkteindüsung ergibt (Inhomogenität), nicht abbilden kann. Beim ND-Verfahren mit PFI (Port-Fuel-Injection) konnte man von einer ausreichenden Homogenität ausgehen.

Des Weiteren wurde am Prüfstand Seitens LKV ein verändertes Kolbendesign für Schichtladungen verwendet, um im MD/HD-Betrieb unter insgesamt mageren Luft-Kraftstoffverhältnissen den Methankraftstoff vorwiegend in das Zentrum des Brennraums zu sammeln und so Partial-Burn-Effekte an den Wänden zu vermeiden und gleichzeitig bei gleicher Kraftstoffmenge höhere Flammengeschwindigkeiten zu erreichen.

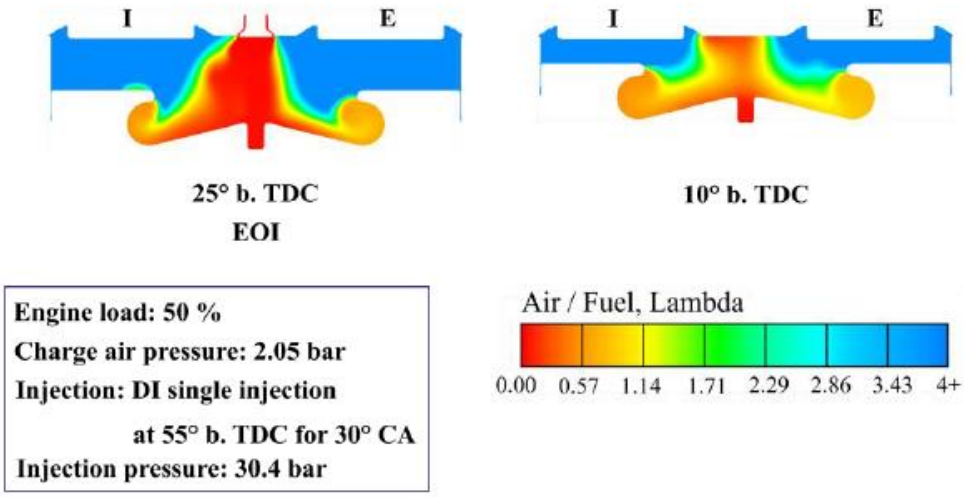

Abbildung 9: Ausbreitung der Methanmasse im Brennraum nach der Eindüsung (Lambda-Verteilung)[2]

Die Phänomene der Gemischbildung bei Direktinjektion wurden Seitens des LKV der Uni Rostock bereits in komplexen 3D-CFD-Simulationen untersucht, da man sich durch die Umstellung von ND-PFI zu MD-DI ein hohes Potential hinsichtlich Methanschlupf-Emissionsreduktion, Effizienzsteigerung und letztendlich geringeren Kosten gegenüber HD-DI Verfahren erhofft. Zusätzliche rechenaufwendige Simulationen wurden durchgeführt mit dessen Ergebnisse die lokalen Mischbedingungen (Lambda) kurz vor ZOT in Abhängigkeit des Startzeitpunktes der Methaneindüsung ermittelt werden konnten. Entsprechende Approximationsformeln wurden mittels Messdaten entwickelt anhand derer Näherungen des lokalen Lambdas im Zentrum und in Wandnähe ermittelt werden können. Das lokale Lambda des Zentrums geht über eine Korrelationsformel der laminaren Flammengeschwindigkeit von Methan in das Partial-Burn-Modell ein, da es Aufschluss über die Brennbedingungen vor ZOT liefert. Das lokale Lambda in Wandnähe wird zur Anpassung des Crevice Mechanism verwendet; lokal geringere Methankraftstoffkonzentrationen bewirken hier geringere Methanemissionen.

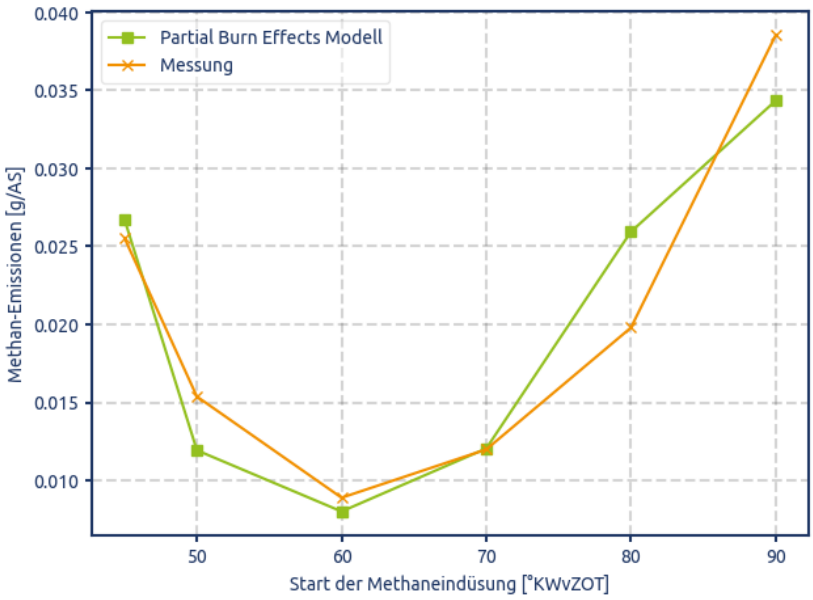

Abbildung 10: Vergleich Messung vs. Modell: Methanemissionenen bei Variation des Methaneindüse-Timings im MD-Brennverfahren

Die beschriebenen Modellbestandteile konnten erfolgreich in eine FMU (Functional Mockup Unit) basierend auf der Software FMUSDK Qtronic/Synopsis (https://resources.qtronic.de/) mit integriertem Windows/Linux-Compiler eingebunden werden, sodass diese in andere Softwareumgebungen nutzbar sind. Der Export/die Verknüpfung der FMU mit anderen Softwareprodukten sowie die Testung der beinhaltenden Methanschlupf-Submodellen wurden erfolgreich durchgeführt. Im Detail wurde im Zuge der Modellentwicklung die universelle Schnittstelle „Functional Mockup Interface“ (FMI) eingerichtet, die es ermöglicht die Modellkomponenten/-funktionen in andere gängige kommerzielle Systemsimulationssoftware, abseits der von uns verwendeten (AVL Cruise M), zu nutzen (PlugIn-Fähigkeit). Zunächst stand hierbei die grundsätzliche Integrations- und fehlerfreie Lauffähigkeit der FMU und dessen Modellkomponenten und nicht die Entwicklung eines weiteren vollumfänglichen Motormodells im Vordergrund. Daher wurde sich zu Beginn der Projektlaufzeit darauf beschränkt ein sichtlich vereinfachtes Modell in alternativer Software aufzusetzen. Anschließend wurde exemplarisch das Partial-Burn-Modell als Teil des Methanschlupfmodells, welches bereits in die FMU implementiert wurde, getestet, indem drei Modellgrößen nämlich eingebrachte Methankraftstoffmasse, Lambda sowie Temperatur der unverbrannten Zone (2-Zonen-Modell) aus der Simulation in AVL Cruise M als konstante Größen in die alternative Simulationsumgebung künstlich eingesetzt wurden. Nach Ausführung der Simulation lässt sich durch Vergleich der Ausgabewerte (Restmethanmasse aufgrund unvollständiger Verbrennung) feststellen, ob die

Berechnungen der FMU beim Ausführen in alternativer Software zu denselben oder bis auf vernachlässigbaren numerischen Abweichungen gleichen Ergebnissen führen. Die nachfolgende Abbildung sowie Tabelle zeigt die für diesen Versuch relevante Ein- und Ausgabegrößen der FMU in dem entwickelten 0D/1D-Motormodell in AVL Cruise M.

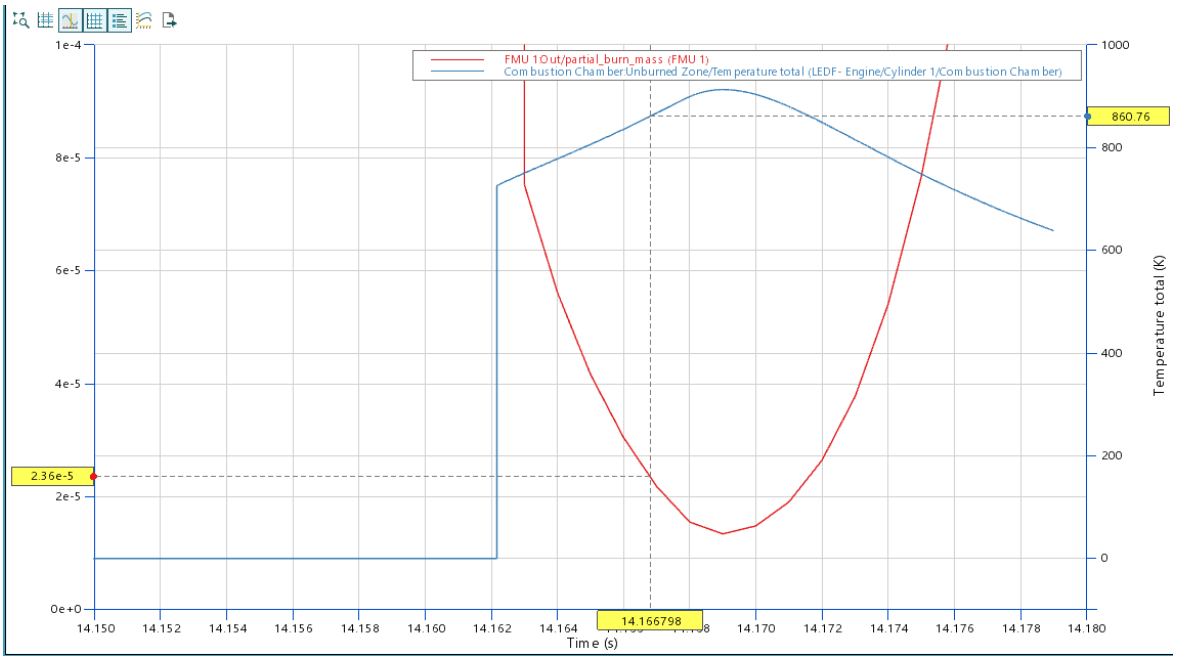

Abbildung 11: Temperatur- und Restmethanmassenverlauf (in Kelvin bzw. kg) in der AVL Cruise M -Simulation

Eingebrachte Methanmasse [g / AS]	3,79
Lambda	2,12
Temperatur Unverbrannte Zone [K]	860
Restmethan (Partial Burn Effects) [mg /AS]	23,6

Abbildung 12: exemplarische Ein- und Ausgabegrößen der FMU in AVL Cruise M

Die resultierende Restmethanmasse von 23,6 mg entspricht bei der in den eingestellten Systemumgebungsvariablen einem spezifischen Methanschlupf von ca. 1,13 g/(kWh), was einer realistisch anzunehmenden Größenordnung entspricht.

Wie in Abbildung 5 erkennbar ergibt sich wie erwartet in GT-Power ein bis auf numerische Abweichungen gleicher berechneter Wert für die Restmasse an Methan, nachdem obige Eingangsgrößen mit den in der Tabelle aufgeführten Werten ins Modell eingingen (siehe Abb. 4).

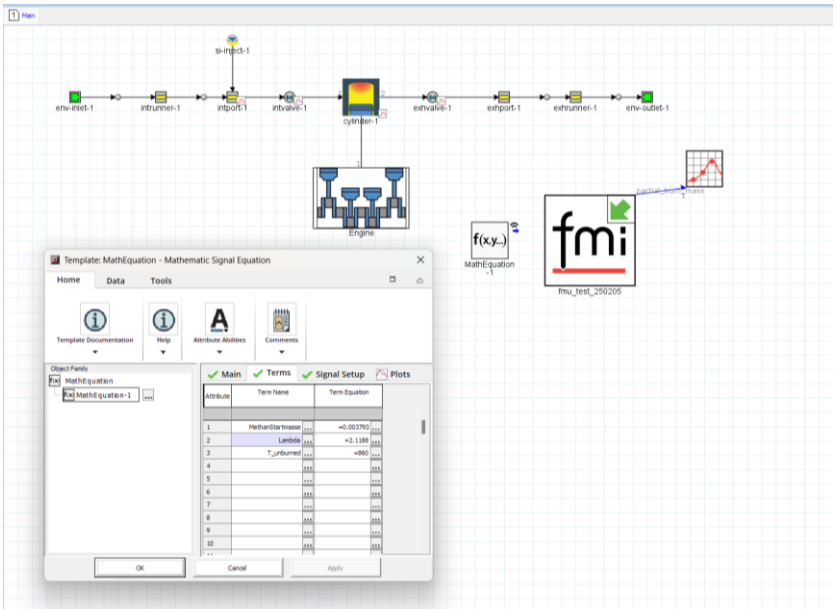

Abbildung 13: Eingabegrößen der FMU in der GT-Power-Entwicklungsumgebung

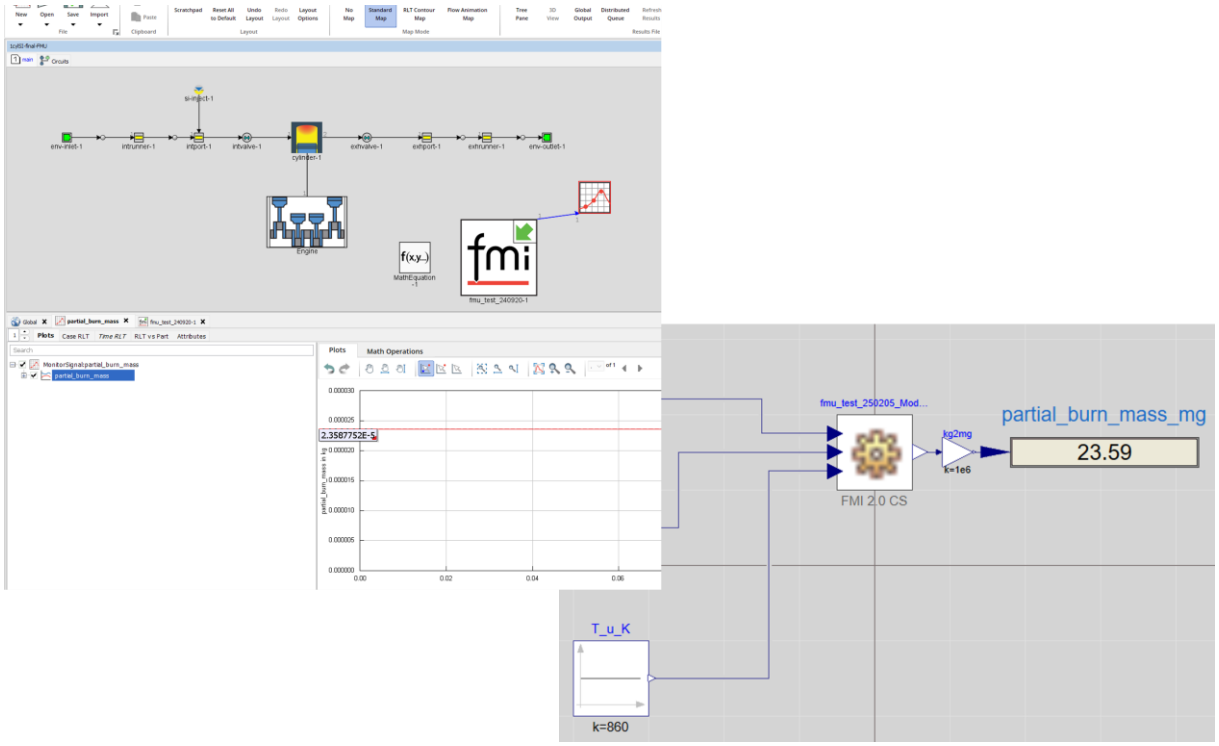

Abbildung 14: übereinstimmende Ausgabe der FMU nach der Simulation in GT-Power und in Dymola

Auch die Testung der Lauffähigkeit und Fehlerfreiheit der Einbindung der entwickelten FMU in Dymola war erfolgreich, wie nachfolgende Abbildung zeigt.

Zusammenfassend konnten wir anhand exemplarischer Versuche feststellen, dass das Methanschlupfmodell durch Implementierung in eine FMU nicht nur in unserem AVL Cruise M-Motormodell ausgeführt sowie mit relevanten motorischen Größen des Modells verknüpft werden kann, sondern dass dies auch in alternativen kommerziellen Softwarepaketen möglich ist. Somit ist sichergestellt, dass das entwickelte Methanschlupfmodell auch von Projektpartnern, die andere Softwareumgebungen einsetzen, genutzt werden kann.

AP 5 Potenzialanalyse Einzelmaßnahmen ND-Gas-Saugrohreinblasung

AP 5.1 Untersuchung veränderlicher Verdichtungsverhältnisse

Das in AP 2.1.2 erweiterte 0D/1D-Motormodell wurde Seitens des LKV Rostock unterstützend bei der Untersuchung des Potentials variabler Verdichtungsverhältnisse bezüglich Kraftstoffersparnis bzw. Wirkungsgradsteigerung genutzt. Gleichzeitig wurden Auswirkungen auf Emissionen und Klopfintensitäten analysiert. Dabei war eine Anpassung des bestehenden Modells an die neuen Anforderungen nötig, um realistische Ergebnisse zu erzielen.

Im Zuge von Messkampagnen am Versuchsträger im Teillastbetrieb (25% und 50%) wurden die durch den hypothetischen Einsatz eines variablen Pleuels verschiedenen Verdichtungsverhältnisse im mittelhohen Bereich untersucht. Dabei konnte (bei guter Schwerpunktregelung) durch Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses von 12,75 auf 14,39 eine Wirkungsgradsteigerung von ca. 1-2 Prozentpunkten erreicht werden. Dies deckt sich auch größtenteils mit den Resultaten des Simulationsmodells. Gleichzeitig zeigen sich spezifische Stickoxid-Emissionen bei Variation des Verdichtungsverhältnisses sowohl in Experiment als auch Simulation nahezu unverändert. CO2-Emissionen zeigen sich mit höherem Verdichtungsverhältnis im Experiment verringert.

Mithilfe des 0D/1D-Modells konnten die Untersuchungen für noch höhere Verhältnisse erweitert werden. Eine weitere Steigerung des Verdichtungsverhältnis auf 16 bzw. 17 ging dabei ebenfalls mit einer (zu erwartenden kleineren) Erhöhung des Wirkungsgrades einher. Zudem geht aus der Simulation bzgl. Methanemissionen ein hohes Einsparpotential hervor.

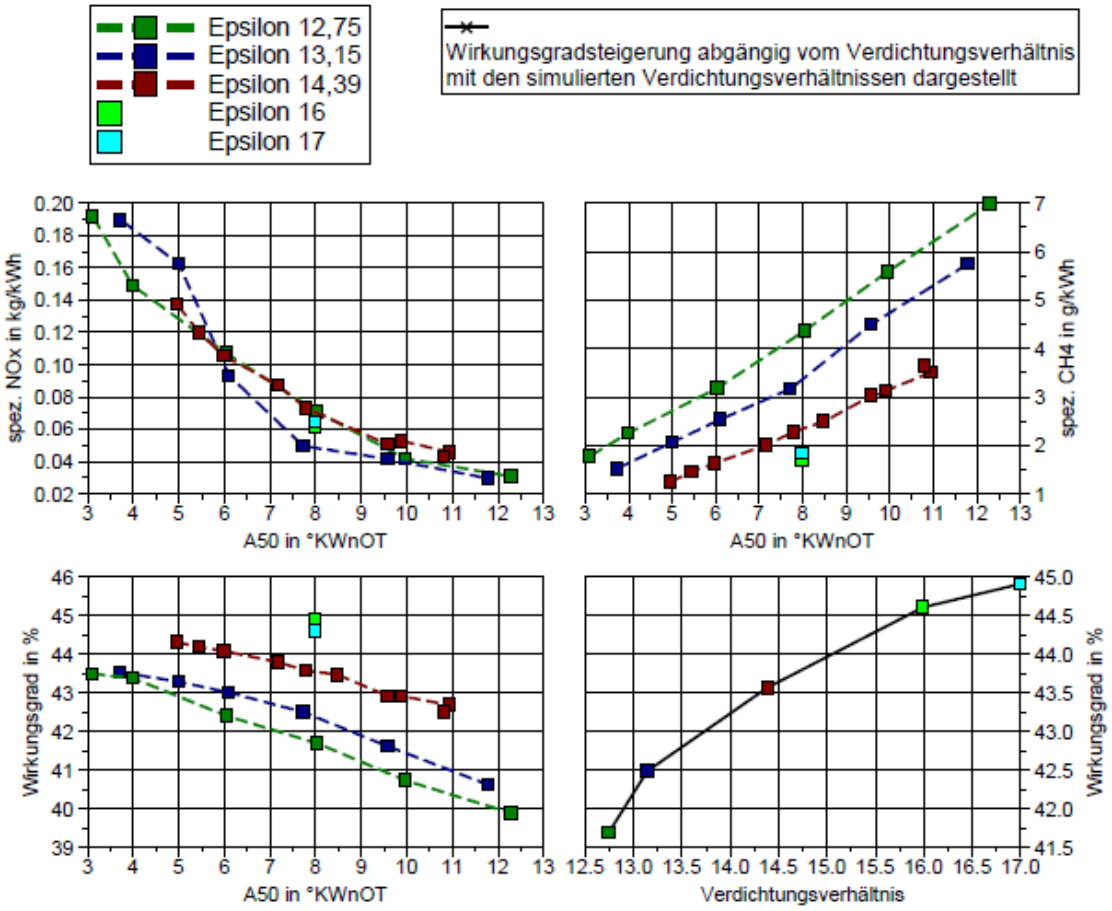

Abbildung 15: Emissions- und Wirkungsgradergebnisse bei 50%-Last-Simulation verschiedener Verdichtungsverhältnisse unter Schwerpunktlagevariation

Limitierend wirkt insgesamt die zunehmende Klopfneigung, die sich durch die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses ergibt. Aus den Simulationsergebnissen lässt sich ableiten, dass im Teillastbetrieb (bis 50%) ein Verhältnis von 16 durchaus mit unkritischen Klopfwerten fahrbar ist, während ein Verhältnis von 17 ein zu hohes Klopfrisiko (bei gleichzeitig kaum zunehmender Effizienzsteigerung) birgt. Höhere Lastpunkte sollten bei einem Verdichtungsverhältnis von maximal 13,15 gefahren werden, um Klopfen zu vermeiden. Hierzu wurde ein Klopfmodell genutzt, welches bereits in AVL Cruise M implementiert und auf Basis eines Arrhenius Ansatzes konzipiert ist. Eine Parametrierung dessen wurde validiert vorgenommen. Zusammenfassend ergibt sich aus den Untersuchungen ein hohes Potential eines VCR (Variable Compression Ratio) Systems bezogen auf Effizienz und Emissionsreduktion des betrachteten 1-Zylindermotors.

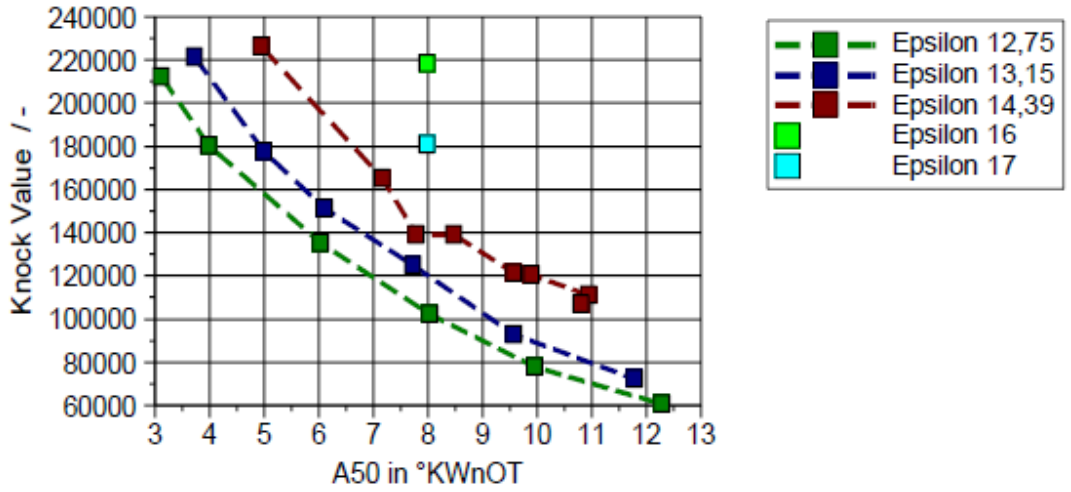

Abbildung 16: Klopfintensität bei 50%-Last-Simulation bei verschiedenen Verdichtungsverhältnissen unter Schwerpunktlagevariation

Nach und während der Vorauslegung der Verdichtungsverhältnisse mit 0D/1D Motorprozessrechnung wurden Seitens LKV entsprechende Versuche mit verschiedenen Verdichtungsverhältnissen am Versuchsträger gefahren. Die Ergebnisbewertung wurde im vorherigen AP vollzogen.

AP 5.2 Technologiepakete zur nachmotorischen Methanreduktion

Das AP 5.2 teilt sich in drei separate Untersuchungspakete auf. Diese umfassen einerseits Modellgasuntersuchungen im Labormaßstab an Katalysatorkernproben, andererseits Untersuchungen mit realem Abgas am Motorenprüfstand.

Der Modellgasprüfstand ist ein gut geeignetes Werkzeug, um reproduzierbare Bedingungen zur Analyse einzelner Katalysatoren herzustellen. Damit lassen sich die unterschiedlichen Technologien bezüglich ihrer Eignung für den geplanten Anwendungsfall untersuchen und vergleichen.

Zusammen mit den Projektpartner der Universität Rostock sowie der Umicore AG & Co. KG wurden die voraussichtlichen Randbedingungen sowie zu erwartenden Abgasparameter zusammengetragen. Hieraus konnte schließlich ein Messprogramm zur Analyse der Katalysatorproben am Modellgasprüfstand entwickelt werden.

Die Eckdaten des Messprogramms wurden im Anschluss mit den Möglichkeiten des aktuellen Prüfstandsaufbaus abgeglichen. Hierfür wurden die Flussraten der einzelnen Gase aus dem Messprogramm für eine Standardprobengröße von 25,4 mm Durchmesser und 76,2 mm Länge berechnet und mit den vorhandenen Massflow-Controllern (Regelbaustein zur Einstellung und Regelung für jede Gasspezies) abgeglichen. Da bei den vorhandenen Massflow-Controllern nicht für alle Gasspezies Kalibrierkurven hinterlegt sind, wurden zusätzliche Kalibrierfaktoren zur Einstellung der entsprechenden Gasströme berechnet

sowie experimentell überprüft. Diese werden später dem Messprogramm aufgeprägt. Ein während der Projektlaufzeit separat beschafftes Abgasmessgerät basierend auf der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) wurde in Betrieb genommen und in die Prüfstandsstruktur integriert.

Für die anstehenden Versuche wurde ein neues Layout für die Probenhalterung entwickelt, wodurch Strömungstotgebiete im Einlaufbereich vor der Katalysatorprobe minimiert werden konnten. Mit diesem Halter wurden erfolgreich Funktionstest durchgeführt.

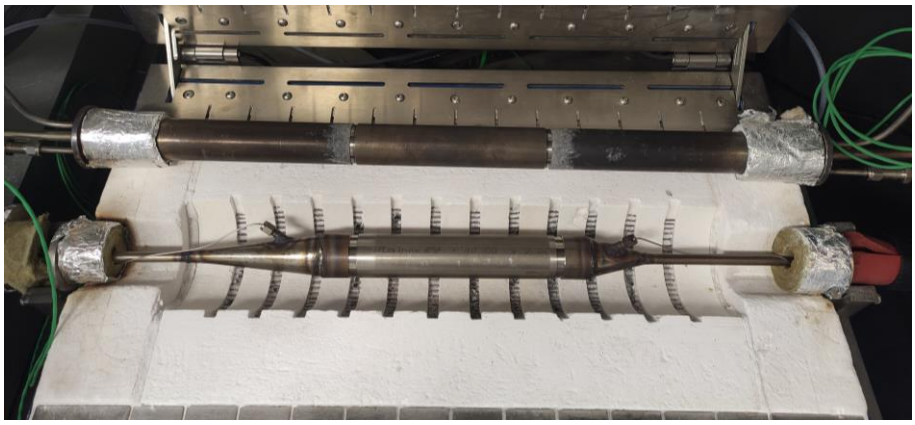

Abbildung 17: Alter (oben) und neuer (unten) Probenhalter Modellgas-Prüfstand

Die Messdatenerfassung wurde entsprechend adaptiert. Weiterhin wurde maschinenbaulich die Abgasführung nach Reaktor inklusive Begleitheizung ausgelegt, konstruiert, gefertigt und installiert. Diese Systemteile sind ebenfalls in Betrieb genommen worden.

Es fanden Abstimmungen mit dem Projektpartner Umicore zu Pre-Tests am Modellgasprüfstand statt. Dies schloss unter anderem die trockenen und feuchten Light-Off Tests und die Untersuchung der Einflüsse von Stickstoffmonoxid (NO) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) auf die Katalysatorperformance mit ein. Beide Spezies sowie die Ausgangsstoffe und die Reaktionsprodukte der Methanoxidation wurden mit Hilfe der FTIR-Anlage getrackt (für den beteiligten Sauerstoff zur CH_4-Oxidation wurde eine Bilanzierung über den CO_2-Wert durchgeführt).

Die Katalysatoren für die Tests sind vom Projektpartner zur Verfügung gestellt worden. Die Proben für die Versuche konnten aus den Katalysatorsteinen entnommen werden und das notwendige cannen der Testkatalysatoren wurde ebenfalls durchgeführt (siehe Abbildung).

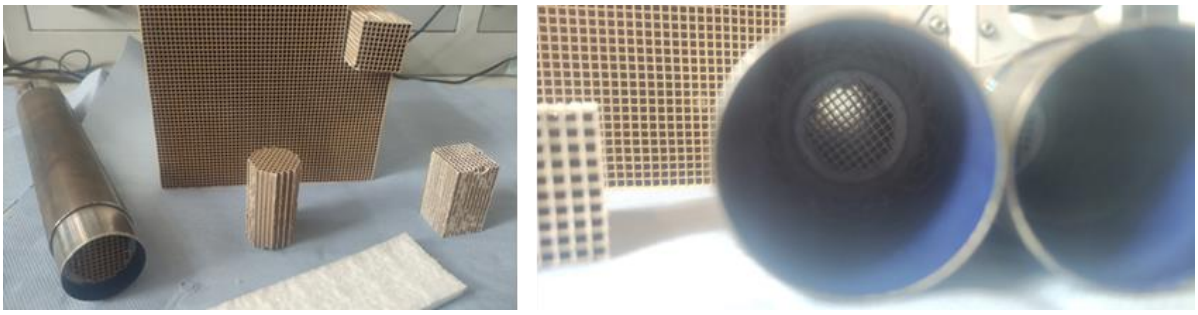

Abbildung 18: Katalysatorproben (li.) inkl. Canning (re.)

Das Messprogramm, insbesondere die notwendigen Dosiermengen, wurde ausgelegt, berechnet und mit dem Projektpartner Umicore abgesprochen. Eine Überprüfung der Dosiermengen und der Testautomatik erfolgte.

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme von Hard- und Software konnten einige Messungen zur Systemvalidierung durchgeführt werden. Neben einem grundsätzlichen Systemtest mit Stickstoff und Druckluft zum Betriebsverhalten des überarbeiteten Probenhalters, wurden vornehmlich die für die anstehenden Versuche notwendigen Gase in Tests zudosiert, um das Antwortverhalten der neuen Messanlage sowie die Funktionalität des überarbeiteten Gaspfades zu überprüfen.

Abbildung 19: Prüfaufbau Modellgasprüfstand mit Gasdosier- und Mischeinheit (links), Ofen (rechts) und FT-IR-Spektrometer (vorn rechts)

Die Abstimmung zum Versuchsprogramm erfolgte zusammen mit dem Projektpartner Umicore, der auch die Katalysatorsteine für die Modellgasversuche sowie für die Versuche am Versuchsmotor M34 zur Verfügung stellt.
Neben vier aktiven Katalysatorsteinen wurden auch zwei unbeschichtete „Dummys“ zur Verfügung gestellt. Mit diesen wurden Probecannings durchgeführt und in die

Bypassstrecke des Versuchsmotors eingebracht. Hierbei wurde zunächst das thermische Verhalten und die Rückwirkungen auf den Versuchsaufbau sowie den Einfluss auf die Regelstrecke untersucht. Anschließend wurden die katalytisch aktiven Steine eingesetzt.

Abbildung 20: Durch Projektpartner Umicore zur Verfügung gestellte Versuchskatalysatoren

Aus einem der aktiven 100cpsi Katalysatorsteine wurden zwei Proben mit den Abmaßen 25,4mm Durchmesser und 50,8mm Länge für die Tests am Modellgasprüfstand entnommen. Hierbei wurde der zunächst quadratische Querschnitt von 10 x 10 Kanälen auf insgesamt 76 Kanäle reduziert. Die Kernprobe wurde anschließend in einer inert beschichteten Edelstahlaufnahme mittels Lagermatte fixiert.

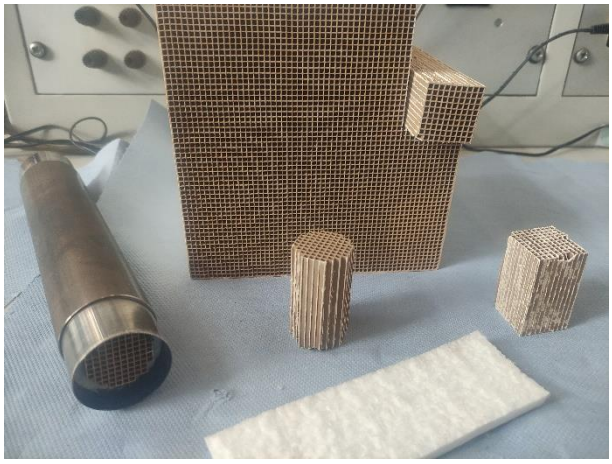

Abbildung 21: Katalysatorstein mit entnommenen Kernproben, Lagermatte und gecannter Probe

Das erste Messprogramm umfasste eine generelle Katalysator-Charakterisierung. Hierzu wurden Light off Test durchgeführt. Dabei wurde von einer Starttemperatur mit erwartungsgemäß geringem bis keinem Umsatz eine definierte Temperaturrampe

abgefahren, bei welcher sich entsprechend der Reaktionskinetik der temperaturabhängige Umsatz erhöhte. Im Falle der Methanoxidation wurde zunächst nur Methan mit Druckluft sowie Stickstoff zum inerten „Auffüllen“ der Gasmischung verwendet.

Tabelle 3: Übersicht Gaszusammensetzung (Sollwerte) Light off Tests

Nr.	Bezeichnung	cCH4	cO2	cNO	cCO2	cN2
1	CH4 only	1.000ppm	8 vol-%	-	-	Balance
2	Einfluss NO	1.000ppm	8 vol-%	250ppm	-	Balance
3	Einfluss NO und CO2	1.000ppm	8 vol-%	250ppm	8 vol.-%	Balance

Im Rahmen der weiteren Messungen wurde der inhibierende Einfluss von NO und CO_2 geprüft. Wasserdampf, der aus der Verbrennung zwangsweise im Abgas vorkommt, hat ebenfalls einen starken inhibierenden Effekt, was im Rahmen der Tests jedoch noch nicht analysiert wurde. Die Tests wurden im Temperaturbereich von 250°C bis 500°C durchgeführt. Nach einer Haltezeit bei der hohen Temperatur wurde im Anschluss eine definierte Abkühlphase durchfahren. Typischerweise gibt es hierbei einen Hysterese-Effekt, also unterschiedliche Verläufe zwischen Aufheizen und Abkühlen.

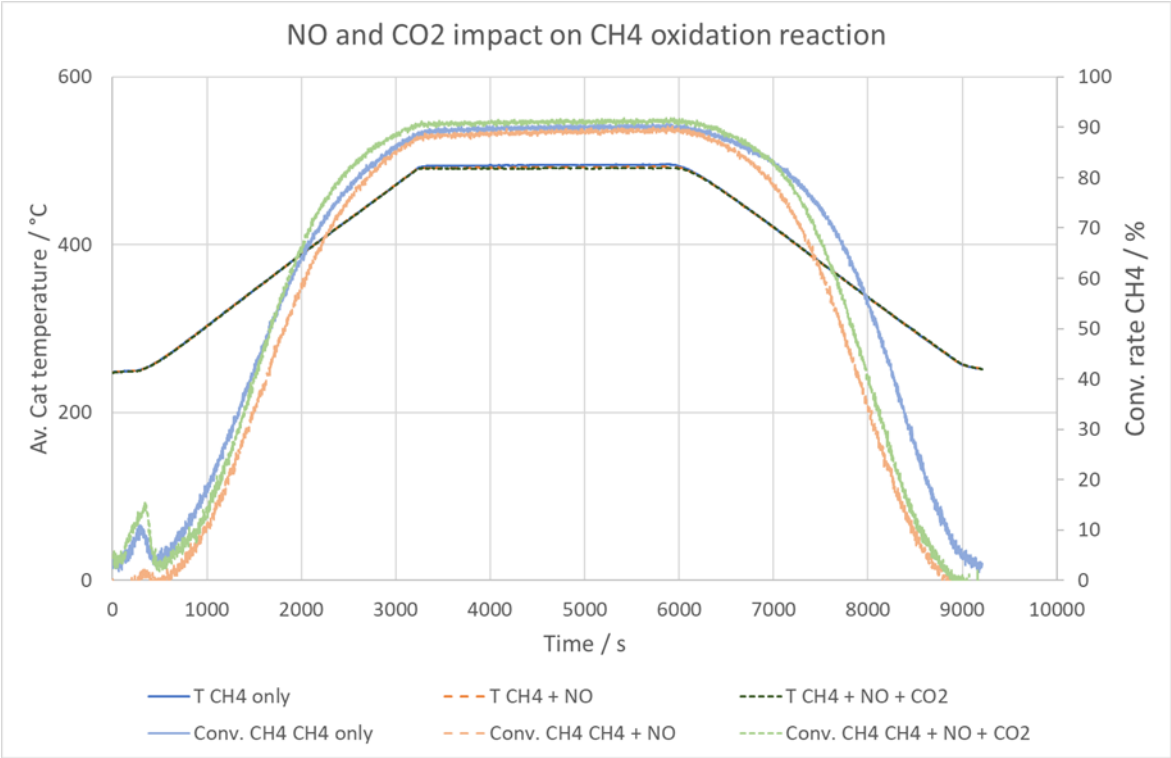

Abbildung 22: Vergleich Temperaturverläufe und CH_4-Umsatz Light off/out CH_4-Oxidation als Zeitverlauf

Im Projektzeitraum wurden mehrere Messungen durchgeführt. Zunächst fand eine Vermessung des NO-Oxidations-Vermögens der vorliegenden Technologie an. Es bestand

die Arbeitshypothese, dass im Katalysator aus dem NO gebildetes NO_2 instantan zur Oxidation von Methan verwendet wird. Dies geschieht bereits bei geringeren Temperaturen als es mit molekularem Sauerstoff der Fall wäre und beeinflusst somit das Niedertemperatur- und Light off Verhalten positiv.

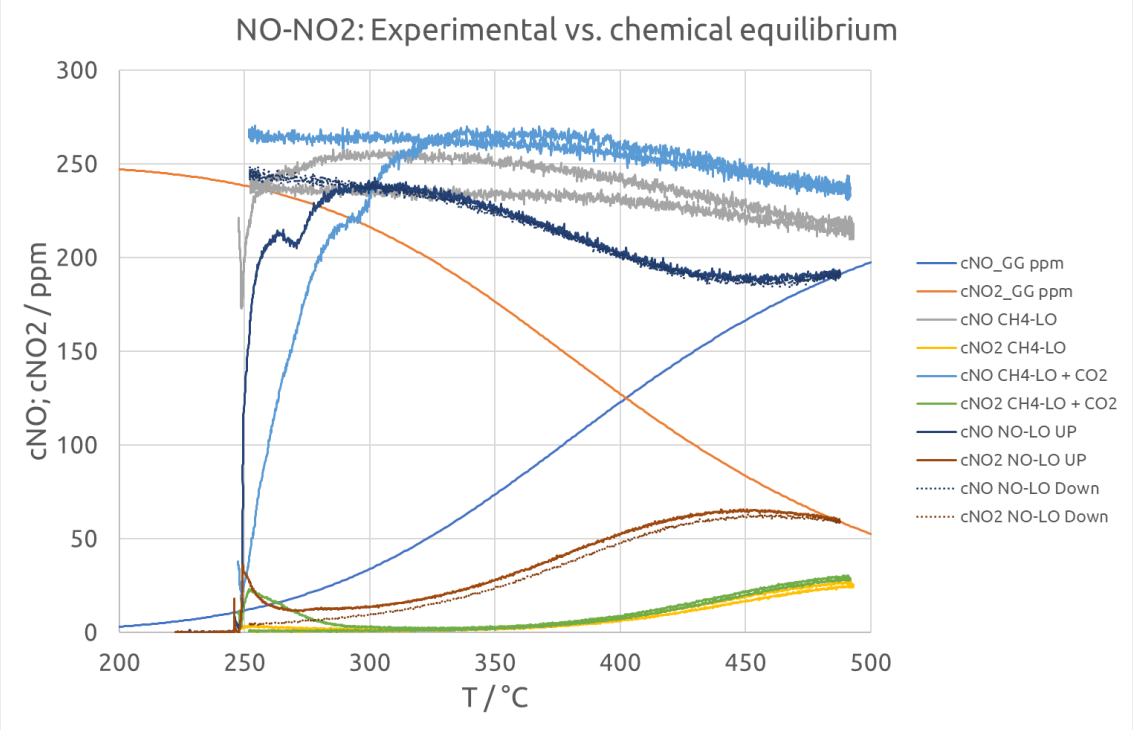

Abbildung 23: NO- und NO2-Konzentration verschiedener Light Off Tests sowie Gleichgewichtskonzentrationen aus theoretischer Berechnung

Das Diagramm zeigt die über der mittleren Katalysatortemperatur aufgetragenen Konzentrationen von NO- und NO_2. Von besonderem Interesse sind hier die hellblaue sowie die orangene Kurve, die die NO- respektive NO_2-Konzentration aus der Berechnung des chemischen Gleichgewichtes unter vorliegenden Randbedingungen (Anfangskonzentration, Gaszusammensetzung, Temperatur) darstellt. Das Erreichen des chemischen Gleichgewichtes benötigt – je nach Reaktion – meist viel Zeit oder einen guten Katalysator, der zum schnelleren Erreichen des Gleichgewichtszustandes hilft, diesen Zustand aber nicht nach oben oder unten zugunsten eines der Edukte oder Produkte verschieben kann. Weiterhin ist die braune Kurve der NO_2-Konzentration im Fall von lediglich zudosiertem NO interessant. Diese liegt deutlich oberhalb der gelben und grünen Graphen, welche die NO_2-Konzentration in Anwesenheit von Methan im Feedgas wiedergeben. Die Summenkonzentration NO und NO_2 ist in allen Versuchen gleich groß. Zwischen den Fällen mit und ohne Methan besteht eine beträchtliche Differenz, welche einer Oxidationsreaktion des Methans mit dem sehr reaktiven NO_2 zugeschrieben werden kann. Im Falle fehlenden Methans wird im Bereich um 475°C der Gleichgewichtszustand für das System NO-NO_2 erreicht.

Um die Arbeitshypothese der Methanoxidation durch NO_2 zu untermauern, wurde ein zusätzlicher Test durchgeführt. Hierbei wurde anstatt Sauerstoff nur NO_2 als Oxidationsmittel in die Feedgas-Matrix eindosiert.

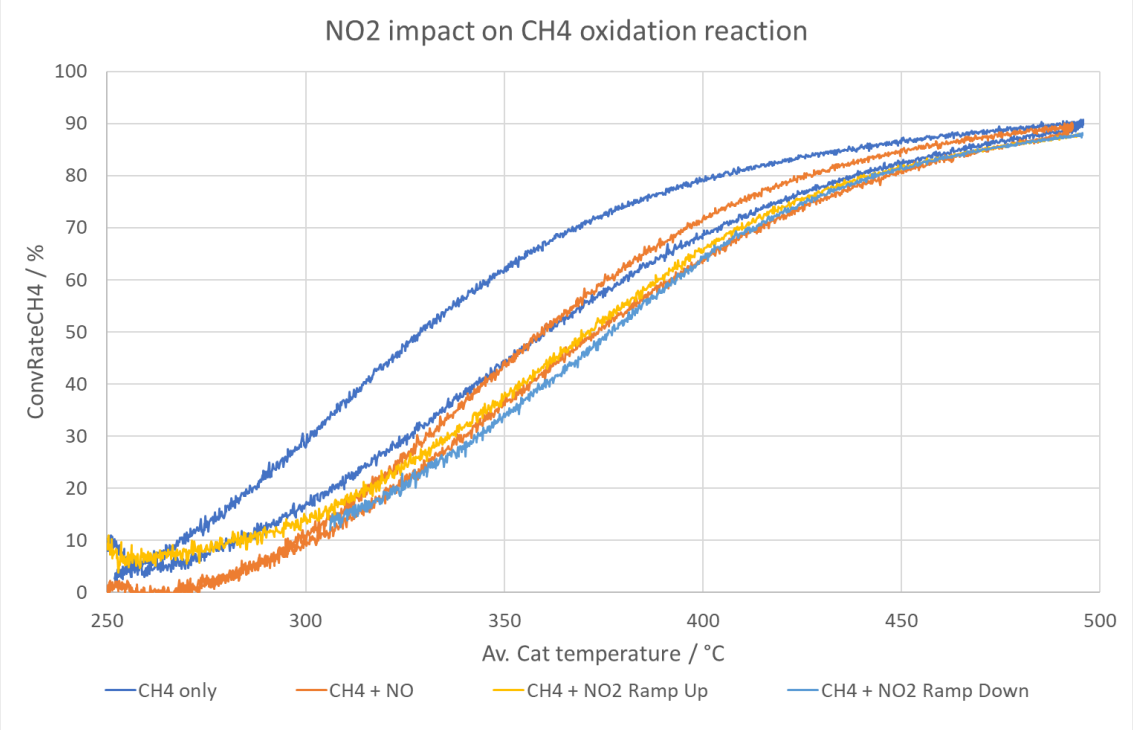

Abbildung 24: Methan-Oxidations-Vermögen von NO_2

Abbildung 24 zeigt in der gelben (Light Off) und hellblauen (Light Out) Kurve das Oxidationsvermögen von NO_2. Beim vorliegenden Versuch bestand das Feedgas lediglich aus Methan, NO_2 und Stichstoff. Als Vergleich sind die bereits bekannten Referenzen für Methan mit Sauerstoff in Stickstoff sowie aus dem Versuch mit zusätzlichem Stickstoffmonoxid abgebildet. Insbesondere beim Light Off und geringen Temperaturen ist durch das NO_2 ein merklicher Umsatz erkennbar. Da dieses direkt zugegeben wird und nicht erst im Katalysator aus dem vorhandenen NO gebildet werden muss, bleiben Oberflächenplätze frei, werden nicht durch NO und dessen Nebenreaktionen blockiert und es kann bereits CH_4 umgesetzt bzw. reduziert werden. Bei weiter steigender Temperatur wird die Reaktion im Vergleich wieder etwas langsamer, was vermutlich durch Anlagerung des zu NO reduzierten NO_2 an der Oberfläche – analog zum Versuch mit NO-Zugabe – bedingt ist. Die Bruttogeschwindigkeit der Methanoxidation ist für beide Systeme sehr ähnlich.

Aus diesen Erkenntnissen ergibt sich die Frage, ob eine erhöhte NO_2-Eingagskonzentration für die Methanoxidation von Vorteil wäre, also ob ggf. eine dem MOC vorgeschalte Komponente, z.B. ein einfach Niedertemperatur-aktive NO-Oxidationskatalysator, einen

positiven Effekt bewirkt. Hierzu wurde das Feedgas mit NO und NO2 zu gleichen Teilen beigegeben. Das entspricht bei aktuellen Katalysator-Technologien und dem relevanten Temperaturfenster dem Ausbeutevermögen.

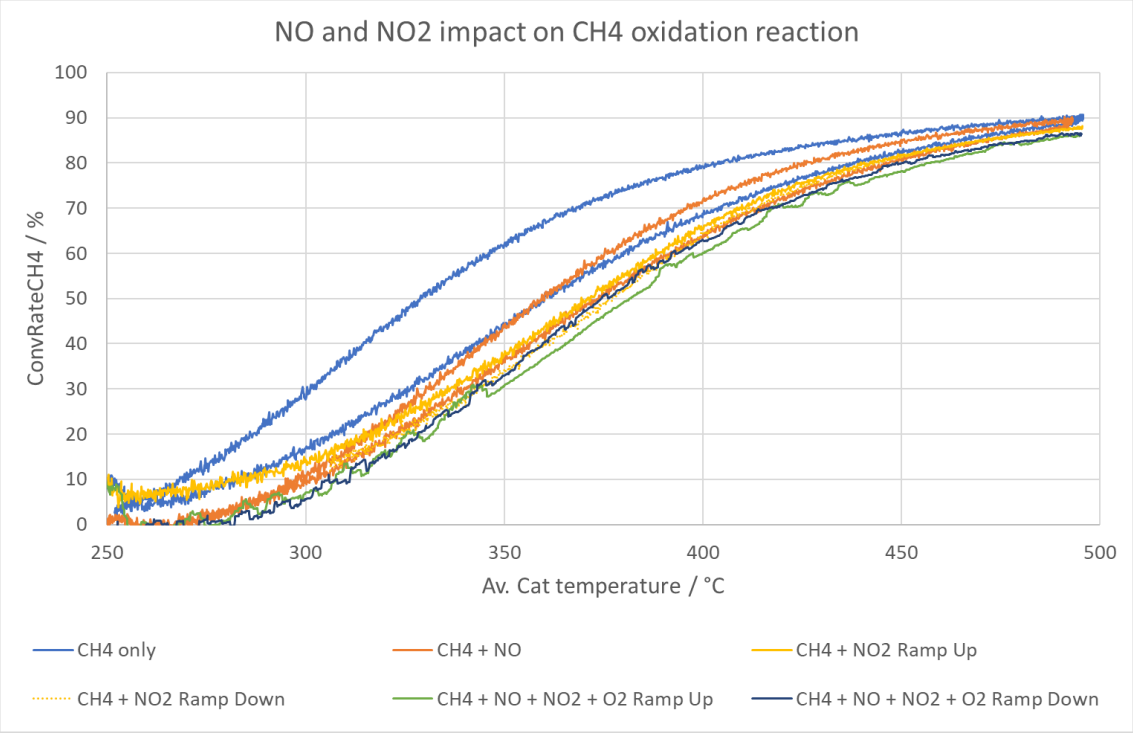

Abbildung 25: Einfluss erhöhter NO_2-Konzentration auf Methanoxidation

Beim vorliegenden Versuch konnte einer Verbesserung der Methanoxidation durch die erhöhte NO_2-Zugabe bzw. die Verschiebung des NO-NO_2-Verhältnisses im Feedgas nicht festgestellt werden. Dies kann auf mehrere Gründe zurückgeführt werden. Einerseits wäre die Konkurrenz auf der Oberfläche zu benennen. Weiterhin ist die Lebensdauer der vorliegenden Katalysatoren sehr begrenzt. Insbesondere Wasser bei höheren Temperaturen sorgt für einen rapiden Aktivitätsverlust.

Die Dauerhaltbarkeit bzw. der zügige Aktivitätsverlust von MOC ist eine bekannte Herausforderung. Um die Performance der Muster für den Betrieb am M34 Einzylinder besser einordnen zu können – der Aktivitätsverlust bei höheren Wasserkonzentrationen im Feedgas beginnt instantan und schreitet zudem rapide voran – wurde eine längere „Alterungsmessung“ mit kontinuierlicher Abgasmessung durchgeführt. Eingangs und ausgangs dieser Messung wurde eine zusätzlich Aktivitätsmessung ohne zusätzliche Wasserdosierung durchgeführt.

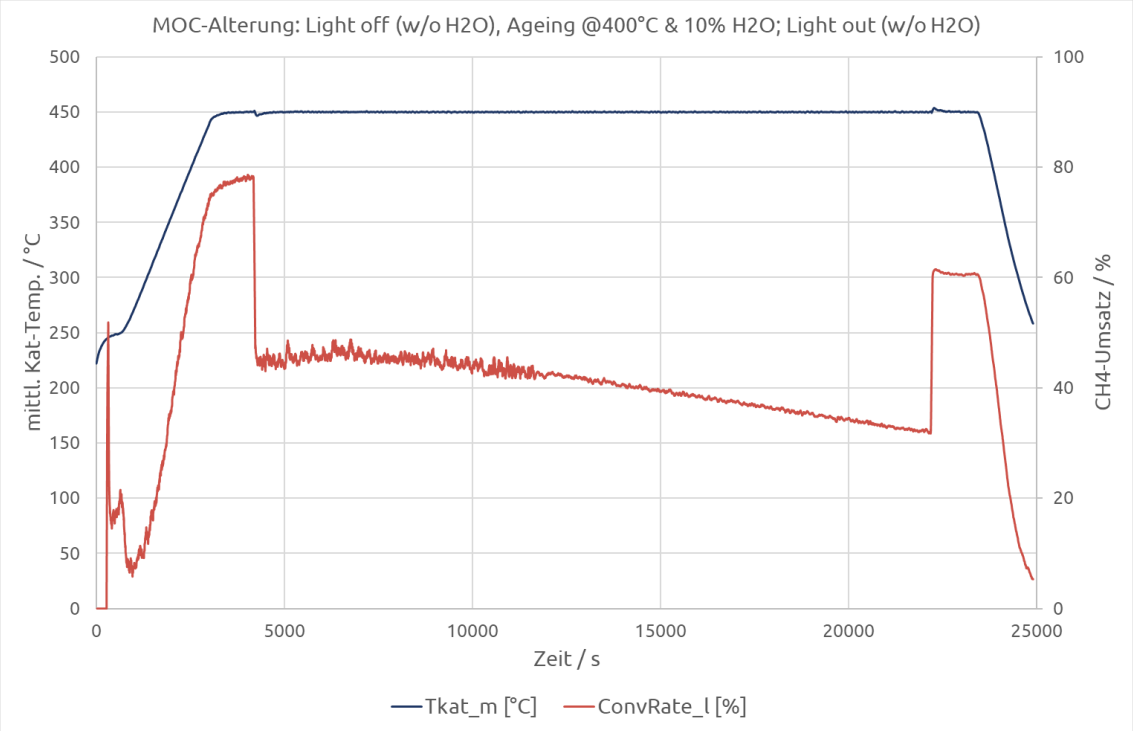

Abbildung 26: Alterungslauf MOC (CH_4 1.000 ppm, O_2 7,9 m.-%, CO_2 9,3 m.-%, H_2O 10 m.-%, N2 balance) und Light off / Light out (CH_4 1.000 ppm, O_2 7,9 m.-%, CO_2 9,3 m.-%, N_2 balance)

Beim Light Off sind eingangs bei Zieltemperatur ohne zusätzliche Wasserdosierung knappe 80% CH_4-Umsatz möglich. Dies bestätigt die vorherigen Versuchsergebnisse. Sobald das System zusätzlich mit 10 m.-% Wasser im Feedgas beaufschlagt wird – das spiegelt dann eher die realen Betriebsverhältnisse am Motor wider – bricht der Umsatz sofort ein. Unter den neuen Randbedingungen sind lediglich 45% Umsatz möglich. Dieser bleibt für etwa eine Stunde konstant, bevor ein Absinken der Methankonvertierung zu verzeichnen ist. Nach fünf Stunden Betrieb unter ähnlichen Bedingungen wie im realen Abgastrakt betrug die Katalysatoraktivität bzgl. der Methanoxidation lediglich 30%. Ein weiteres Absinken mit zusätzlicher Laufzeit ist hierbei zu erwarten. Dabei sollte sich die Umsatzrate auf einen stabilen Wert zwischen 10 und 20% Umsatz hin einpegeln.

Nach Abschalten der Wasserdosierung steigt die Umsatzrate sofort wieder an. Allerdings ist aufgrund permanenter Schädigung der Ausgangszustand von knapp 80% Umsatz nicht wieder erreichbar. Der mögliche Umsatz unter den vorliegenden Randbedingungen nach fünf Stunden Realabgasbedingungen beträgt nur noch 60% und ist dementsprechend um absolut 20% eingebrochen.

Mithilfe dieser Werte lassen sich auch bei längeren Laufzeiten am M34 Einzylinder Prüfstand für die verbauten Testkatalysatoren auf das Niveau eines frischen Katalysators oder eine alterungsresistentere, weiterentwickelte Formulierung zurückrechnen.

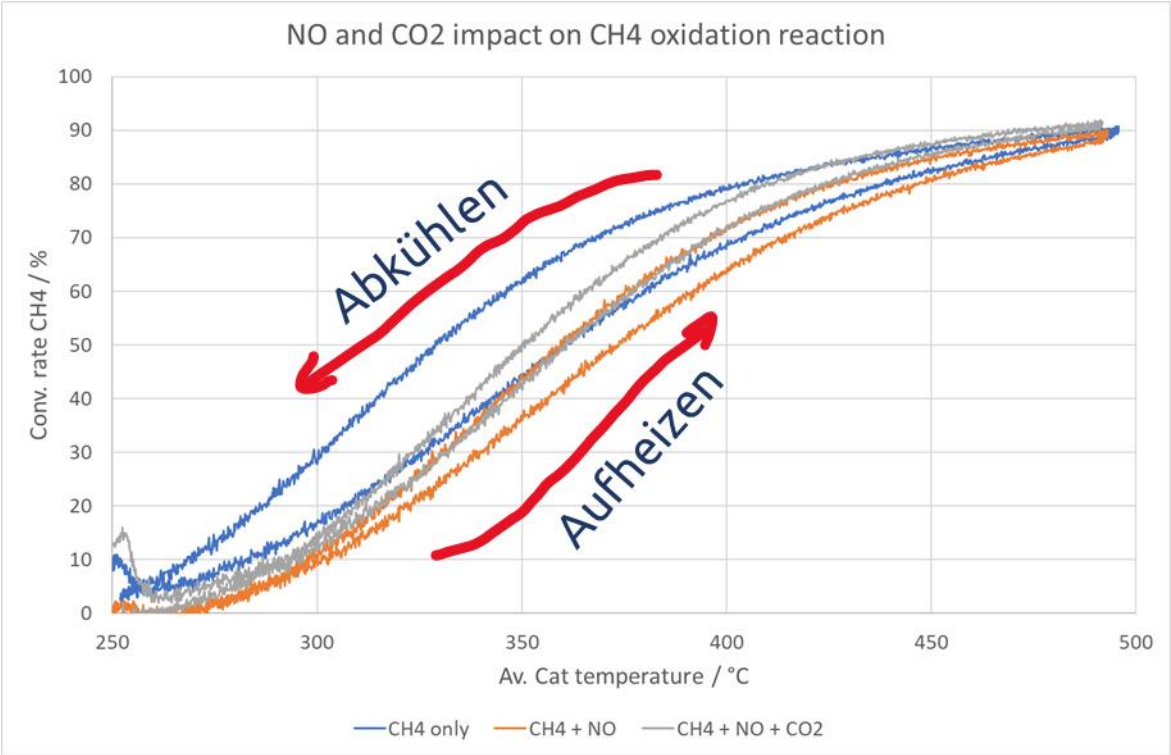

Abbildung 27: Vergleich Umsatz CH_4 Light off/out über mittlerer Probentemperatur

Der Einfluss von Oberflächen-Verbindungen aus NO scheint sich bei höheren Temperaturen (>375°C) umzukehren, sodass eine Förderung der CH_4-Oxidation bewirkt wird. Dies zeigt sich in den schneller zusammenlaufenden Umsatzkurven für Methan für die Fälle ohne und mit NO-Dosierung. Dieser Effekt wurde in einige Literaturquellen für bestimmte Katalysatorformulierungen beobachtet.

Im Falle der zusätzlichen CO_2-Dosierung ist zwar ein leicht verspäteter Anlauf der CH_4-Oxidation zu beobachten, doch werden ab ca. 350°C gleich, bei höheren Temperaturen sogar stärkere CH_4-Umsätze beobachtet.

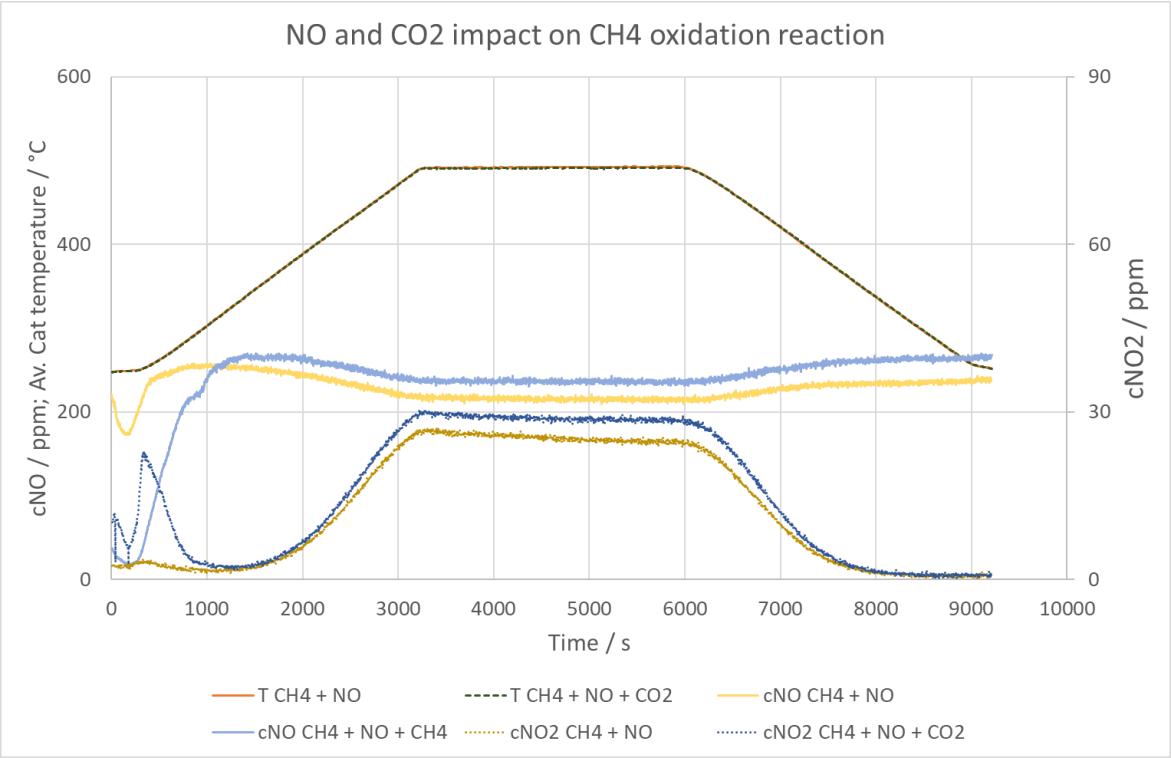

Abbildung 28: NO und NO_2-Konzentrationen als Zeitverlauf

Neben der Oxidation von CH_4 zu CO_2 und Wasserdampf wurde bei NO-Dosierung ebenfalls eine NO_2-Bildung beobachtet. Unterschiede durch das CO_2 sind dabei marginal. Jedoch könnte der verbesserte CH_4-Umsatz bei höheren Temperaturen auf das im Katalysator gebildete NO_2 zurückzuführen sein. Aus eigenen Versuchen an Pkw-Katalysatoren ist ein schnellerer Light off sowie ein verbessertes Niedertemperaturumsatzverhalten für oxidative Reaktionen unter Anwesenheit von NO_2 beobachtet worden. NO_2 ist sehr reaktiv und gibt für Oxidationsreaktionen energetisch einfacher gegenüber der recht stabilen Verbindung beim Sauerstoffmolekül eines seiner Sauerstoffatome ab. Die NO- und NO_2-Konzentration bilden bei ausreichend Verweilzeit ein temperaturabhängiges Gleichgewicht ab. Durch geeignete Katalysatoren kann das Erreichen dieses Gleichgewichtszustandes beschleunigt werden. Der NO_2-Anteil sollte im betrachteten Temperaturbereich höher liegen. Diese These lässt sich durch einen weiteren Testlauf zur Prüfung der NO-Oxidation, entsprechend ohne eine Methan-Dosierung, validieren.

Weiterhin kann durch eine gezielte NO_2-Dosierung am Prüfstand der Benefit dieser zweiten Oxidationsreaktion auf den Gesamtumsatz CH_4 überprüft werden. Ggf. ergibt sich dadurch ein Ansatz für ein optimiertes Abgasnachbehandlungssystem, welches auf mehreren Katalysatortechnologien in Reihenschaltung basiert.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden beim Projektpartner LKV der Universität Rostock eine Bypassstrecke inklusive entsprechender Regelung aufgebaut und motorische Messungen unterstützt.

Im Rahmen des AP 5.2.3 wurden innerhalb der regelmäßigen Web-Konferenzen mit der Universität Rostock und der Umicore AG & Co. KG der grundsätzliche Aufbau der Teilstromstrecke sowie die Grundstruktur der Versuchsmatrix mit entwickelt. Hierdurch ergeben sich die Randbedingung für die Teilstromstrecke. Dies umfasst hauptsächlich die Massen- bzw. Volumenströme sowie Temperatur und Druck.

Da die Katalysatormuster in ein entsprechendes Gehäuse eingebracht werden müssen, wurde seitens der FVTR GmbH eine Variante konstruiert. Diese würde einen möglichst zerstörungsfreien Wechsel der zu prüfenden Katalysatormuster ermöglichen. Dabei wurde jedoch die Problematik eines “inneren” Cannings der Katalysatormonolithen unterschätzt: Nicht alle Muster werden seitens des Projektpartners ein Metallgehäuse bekommen, sodass bei den Monolithen ggf. Zusätzlich Lagermatte und ein inneres VA-Canning angebracht werden müssen. Hierfür wurden zwei Musterversuche durchgeführt. Bedingt durch den sehr hohen Arbeitsaufwand zur manuellen Anpassung des Cannings wurde nach der Mustererstellung auf ein anderes Konzept für das Katalysatorgehäuse zurückgegriffen. Dieses ist aus anderen kommerziellen Projekten bereits bekannt und wird für das vorliegende Projekt bereitgestellt. Einige ältere Modifikationen wurden rückgebaut und das Gehäuse an sich für die anstehende Verwendung auf- und umgearbeitet. Dies umfasst insbesondere einen anderen Durchmesser des Abgasrohres, womit Zu- und Ablauf angepasst werden müssen.

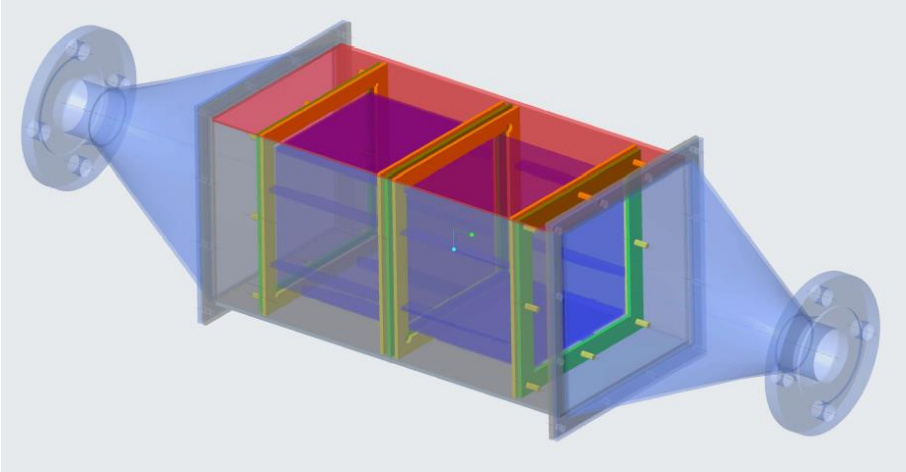

Abbildung 29: Entwurf des neuen Cannings.

Weiterhin wurde für die Teilstromstrecke eine Messblende zur Bestimmung des Abgasmassenstroms ausgelegt. Aufgrund der hohen Temperaturen an dieser Position scheiden viele übliche Messkonzepte aus. Die Bestimmung dieses Massenstroms ist sowohl zur Auswertung und weiteren Verwertung der Messergebnisse als auch zur Regelung der Teilstromstrecke essenziell.

Zur Ermittlung von Katalysatorperformance und der Alterungserscheinungen wurden die Daten vom Modellgasprüfstand ausgewertet und mit dem Projektpartner LKV geteilt. Des Weiteren wurde das Handling der Katalysatorbricks am Prüfstand erläutert sowie die Erfahrung, welche innerhalb der FVTR GmbH in Hinblick auf Methan-Oxidations-Katalysatoren vorhanden ist, dem LKV-Team zugänglich gemacht. Ziel war es, dass Prüfstandsversuche zum Katalysatorverhalten in Eigenregie vom Projektpartner LKV durchgeführt werden können. Dazu wurden Prozeduren zum Aufheizverhalten sowie Betriebspunkte für Performancetests definiert. Es wurde ein Katalysator definiert, welcher im regulären Prüfstandsbetrieb mitläuft. Alterungsversuche fanden im Nachgang in separaten Versuchen statt, um genaue Randbedingungen, welche für die Alterungsverantwortlich sind, im Nachgang nachvollziehen zu können. Des Weiteren wurden sämtliche Vorkehrungen getroffen, um eine detaillierte Auswertung der Prüfstandsdaten durchzuführen.

AP 5.3 Nutzbarkeit ausgeweiteter variabler Ventilsteuerzeiten zur Verbrennungsführung

Mittels der Flexible Camshaft Technology (kurz FCT) lassen sich am Versuchsträger variable Ventilsteuerzeiten im Einlass und Auslass realisieren und damit Miller-Zyklus-Effekt erreichen. Hierzu wurden bereits seitens des Projektpartners LKV im Zuge einer Dissertationsarbeit Auswirkungen durch den Einsatz dieses Mechanismus auf Motorleistungen untersucht (siehe [9]).

Die durch FCT ermöglichten veränderten Ventilsteuerzeiten ließen sich im 0D/1D-Modell durch Anpassung der zugehörigen Hubkurven der Ein- und Auslassventile realisieren. Durch das Ersetzen des hydraulischen Antriebs des FCT-Mechanismus durch einen 3-Phasen-Elektromotor und einem Encoder Seitens des LKV ist es am Versuchsträger möglich ausgeweitete variable Ventilsteuerzeiten zur Verbrennungsführung einzustellen. Entsprechende Tabellen der Hubkurven können vom LKV zur Verfügung gestellt und somit in die Simulation problemlos eingebunden werden, wodurch der Einfluss des Einsatzes der Technologie auf die innermotorische Verbrennung modelhaft abgebildet und untersucht werden konnte. Grundsätzlich kann zusammenfassend gesagt werden, dass kaum Optimierungspotential hinsichtlich einer CO_2- oder CH_4-Reduktion besteht, da die

applizierten Hubkurven sich als optimal erwiesen haben. Details sind dem Schlussbericht des LKV zu entnehmen.

Die motorischen Versuche beim Projektpartner LKV wurden technisch unterstützt. Detaillierte Ergebnisse sind dem Schlussbericht des Partners LKV der Universität Rostock zu entnehmen.

AP 5.4 Potenzialabschätzung AGR-Einsatz bei DF-Brennverfahren

Um das Potential beschriebener AGR-Systeme im DF-Betrieb von Großmotoren abzuschätzen, wurde wie im Arbeitspakete 2.1.2 bereits beschrieben am Prüfstand des 1M34DF-Zylinder-Motors am LKV der Uni Rostock eine AGR-Strecke entwickelt und aufgebaut. Die resultierenden Messdaten sollen Aufschluss darüber geben, inwieweit der Einsatz von AGR-Systemen zur Reduktion umweltschädlicher Emissionen beitragen kann und welche Auswirkungen sich hierdurch auf verbrennungsmotorische Prozesse ergeben.

Zur simulativen Untersuchung und Abbildung des AGR-Systems war eine vollständige Modellierung der AGR-Strecke nicht notwendig. Die Rückführung des Abgases wurde durch Veränderung der Zusammensetzung des einströmenden Luft-Kraftstoff-Gemisches künstlich herbeigeführt. Dies wurde durch eine entsprechende Anpassung der Umgebungsbedingungen. D.h. die Massenanteile der Einzelspezies des Abgases werden anteilig entsprechend der vorgegebenen AGR-Rate den Randbedingungen des Luftkanals übergeben.

Abb. 4 zeigt die zu erwartende Temperatursenkung während des Verbrennungsprozesses im Zylinder durch Erhöhung der AGR-Rate, was eine verschleppte Oxidationsrate nach sich zieht (veranschaulicht durch den normierten Summenbrennverlauf). Ebenfalls bildet das Modell die zu erwartende Absenkung der laminaren Flammengeschwindigkeit ab (siehe Abb. 5). Die Leistung des Motors im Modell wurde durch eine AGR-Rate von 0,3 gegenüber dem Betrieb ohne AGR um ca. 19% abgeschwächt.

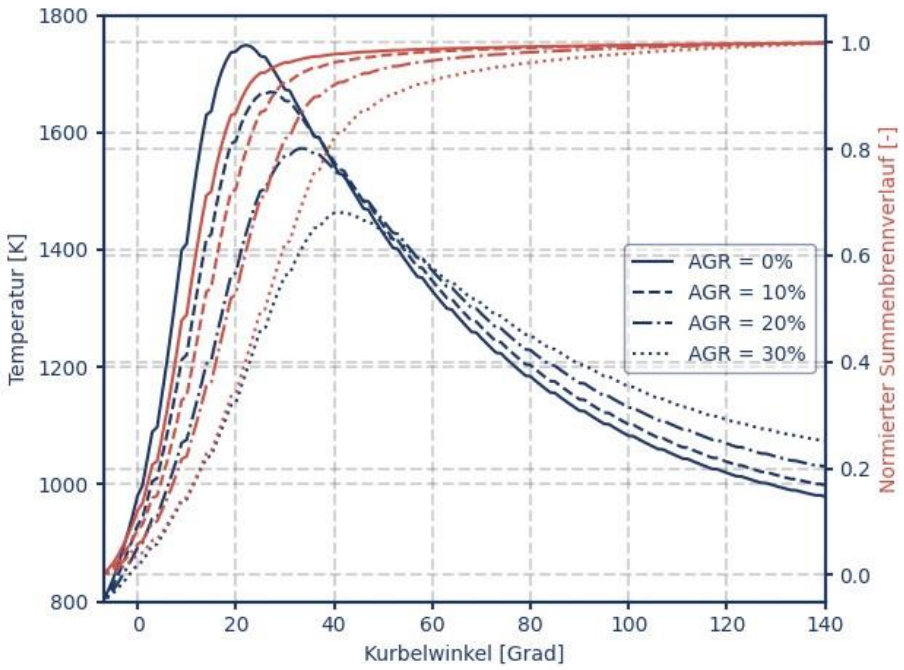

Abbildung 30: Brennraumtemperatur und normierter Summenbrennverlauf während der Verbrennung bei Variation der AGR-Rate

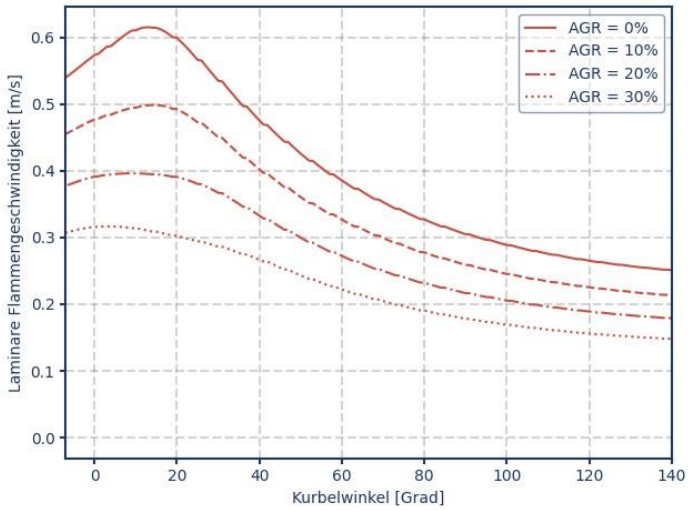

Abbildung 31: Laminare Flammengeschwindigkeit bei unterschiedlichen AGR-Raten

Das AVL-Cruise-Modell berechnet auf Grundlage von Pattas und Haefner basierend auf dem Zeldovich-Reaktionsmechanismus die bei der Verbrennung entstehenden Stickoxide. Dabei werden sechs verschiedene chemische Reaktionen der NOx-Entstehung betrachtet. Die hierbei relevanten Stickoxid-Konzentrationen im Brennraum können mittels Arrhenius-Gleichungen näherungsweise bestimmt werden. Bei der Simulation des exemplarischen Betriebspunktes ist ein signifikanter Rückgang der NOx-Emissionen zu erkennen.

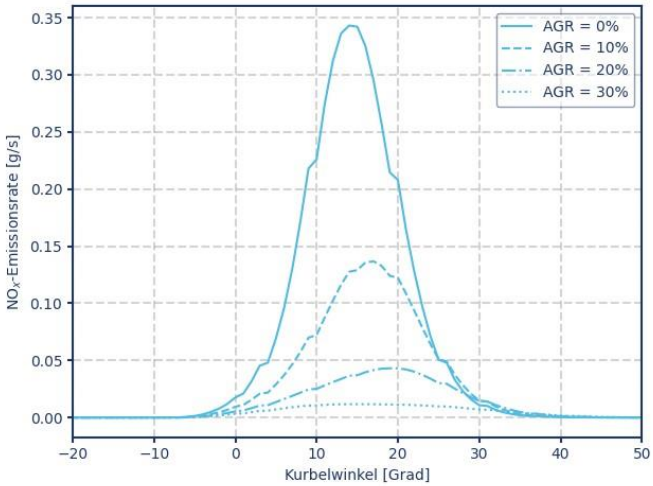

Abbildung 32: Auswirkung der Abgasrückführung auf Stickoxidemissionen

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das um die AGR erweiterte 0D/1D-Modell verbrennungsmotorische Effekte abbildet. Der LKV wurde im Rahmen einer Versuchsplanung mit Hilfe des AGR-Modells unterstützt, sodass die Messmatrix und damit der Versuchsumfang deutlich reduziert werden konnte. Des Weiteren wurden die motorischen Versuche beim Projektpartner LKV technisch unterstützt. Detaillierte Ergebnisse sind dem Schlussbericht des Partners LKV der Universität Rostock zu entnehmen.

AP 5.6 Evaluation regenerativer Kraftstoffe für den Einsatz im DF-Motor

Es fanden im Projektberichtszeitraum mehrere Auswertungen von Messkampagnen am Einzylinder-Forschungsmotor unter dem Einsatz von regenerativem Wasserstoff als Kraftstoff statt. Insgesamt wurden ca. 200 stationäre Betriebspunkte mit unterschiedlichen Substitutionsraten gefahren und entsprechend thermodynamisch mit dem DVA-Tool der FVTR GmbH ausgewertet. Primärer Fokus der thermodynamischen Analyse lag unter anderen in der Bewertung des Einflusses von Wasserstoff auf die Verbrennung, insbesondere Zündung und Zündverzug sowie Brenngeschwindigkeit. Der Wasserstoffgehalt in der Gasmischung wurde auf bis zu 30 $\%_m$ variiert, was aufgrund des hohen Heizwertes einen energetischen Anteil von deutlich über 50% ausmacht.

Exemplarisch sollen an dieser Stelle zwei Variationen vorgestellt werden, in welcher der Anteil von Wasserstoff erhöht wurde bei nahezu konstanter Schwerpunktlage. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Brenndauer sich mit Zugabe von Wasserstoff wesentlich verkürzt. Die Auswirkungen sind im Volllastbereich bereits bei wesentlich geringeren Wasserstoffraten sichtbar.

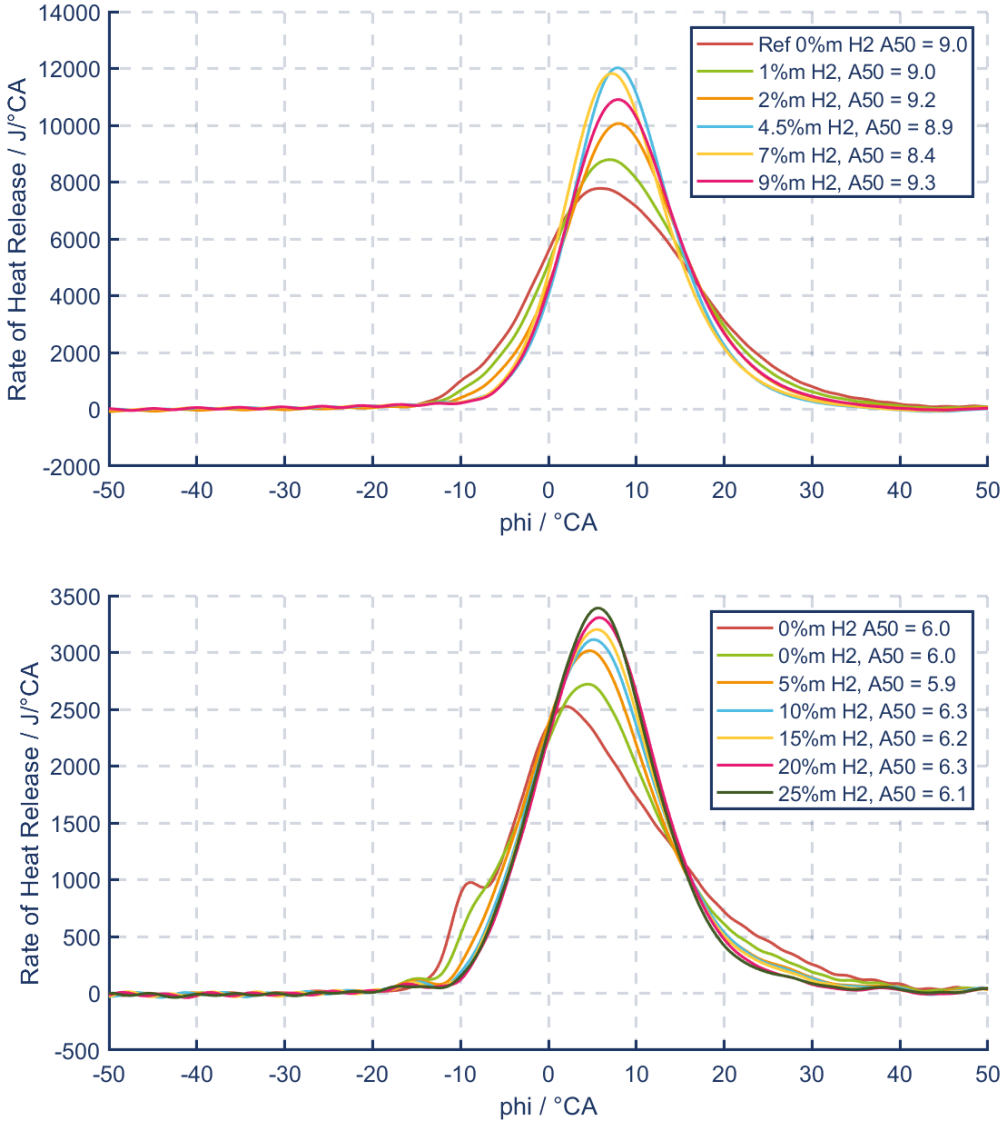

Abbildung 33: Darstellung des Brennverlaufs zweier Betriebspunkte bei 100% Last (oben) und 25% Last (unten) bei Variation des Wasserstoffanteils in Massenprozent und nahezu konstanter Schwerpunktlage.

Weitere detaillierte Auswertungen können dem Schlussbericht des LKV entnommen werden.

AP 7 Gas-Direkteinblasung bei DF-Brennverfahren

AP 7.1 Potenzialanalyse MD-Gasdirekteinblasung bei DF-Brennverfahren

Da bei der MD-Gasdirekteinblasung bei DF-Brennverfahren späte Methan-Eindüse-Timings bewirken, dass das Luft-Kraftstoffgemisch zu Brennbeginn inhomogen ist, finden sich im Brennraum unterschiedliche Mischzonen vor, die mit 0D/1D-Motorprozessrechnung dimensionsbedingt nicht abgebildet werden können. Daher wurden zunächst Seitens LKV eine Reihe rechenaufwendiger 3D-CFD Untersuchungen durchgeführt, um den Mischprozess im MD-Betrieb nachzuvollziehen.

Um eine schnellere Vorabanalyse des Potentials verschiedener Einstellungen der Freiheitsgrade am Motor zu ermöglichen, wurde das bestehende 0D-1D-Modell für die MD-Gasdirekteinblasung neu parametriert. Insbesondere war hierbei eine Anpassung des Wandwärmemodells nötig (siehe Tabelle 4), sodass verbrennungsspezifische Größen wie Brennbeginn, Verbrennungsschwerpunktlage, Heizverlauf, Druckverlauf etc. mit den Messungen (insbesondere im Teillastbetrieb) gut übereinstimmen (siehe Abb. 32).

Tabelle 4: Parametrierung des Wandwärmemodells

Heat Transfer Multiplier

Last	ND	MD
25%	0,7	1,35
50%	0,6	1,1
75%	0,5	1,1
100%	0,3	0,9

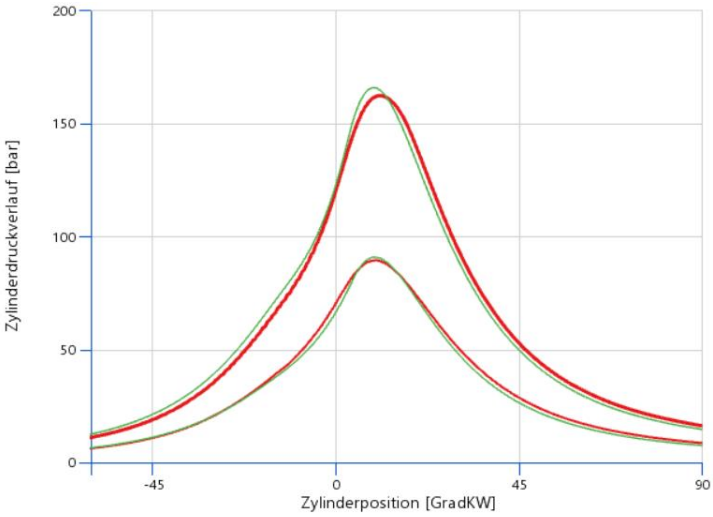

Abbildung 34: Ergebnisse der Parametrierung des 0D/1D-Modells im MD-DI-Brennverfahren (rot: Simulation, grün: Experiment; jeweils 50% und 100% Last)

Das eigens für den ND-Betrieb entwickelte PCA-Methanschlupfmodell konnte mit kleinen Veränderungen die CH4-Emissionen von MD-Messkampagnen mit Standardkolben und relativ früher Methaneindüsung gut vorhersagen. Testergebnisse bilden den aus den Messungen resultierenden Trend ab (siehe Abb. 33).

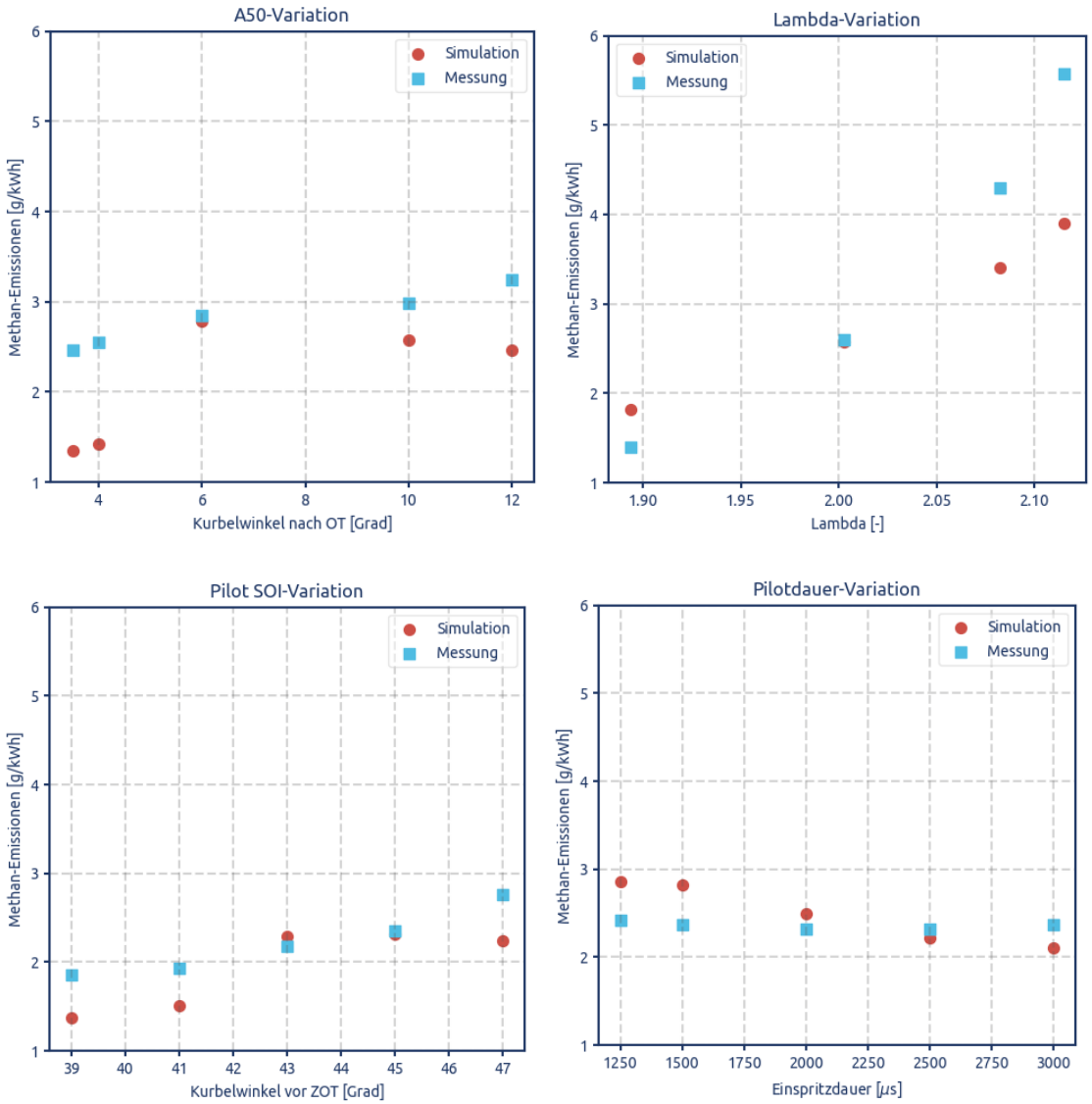

Abbildung 35: Testergebnisse des Methanschlupfmodells im MD-Betrieb bei früher Methaneindüsung [359 GradvZOT]

Bei einem Eindüse-Timing von 359 Grad vZoT des Methankraftstoffes findet eine ausreichende Homogenisierung statt, wodurch trotz DI-Verfahren ähnliche Bedingungen wie im PFI-Verfahren (ND-Betrieb) zu erwarten sind.

Aufgrund des im späteren Projektverlauf durchgeführten Umbaus des Forschungsmotors auf Schichtladungsbetrieb durch den Einbau des neuartigen Kolbens (mit veränderter Kolbenmulde) und deutlich späteren Methan-Eindüse-Timings, war eine Anpassung des Methanschlupfmodells vonnöten. Die resultierenden Inhomogenitäten können mit gewöhlicher 0D/1D-Modellierung nicht dargestellt werden. Wie bereits in AP 2.2.1 beschrieben wurde daher die Modellentwicklung durch 3D-CFD-Prozessrechnung unterstützt. Diese ermöglichen eine genaue Betrachtung der Mischverteilung im Brennraum

(siehe Abb. 34), mit dessen Hilfe eine Methanschlupfvorhersage in Abhängigkeit des Eindüse-Timings bzw. der effektiven Mischzeit bis zur Piloteindüsung des Diesels möglich wurde. Übereinstimmend (aus Experiment und Simulation) konnte so für das Methan-Eindüse-Timing ein Optimum bei ca. 60 °KWvOT zur Reduktion der Methanemissionen identifiziert werden (siehe Abb. 9).

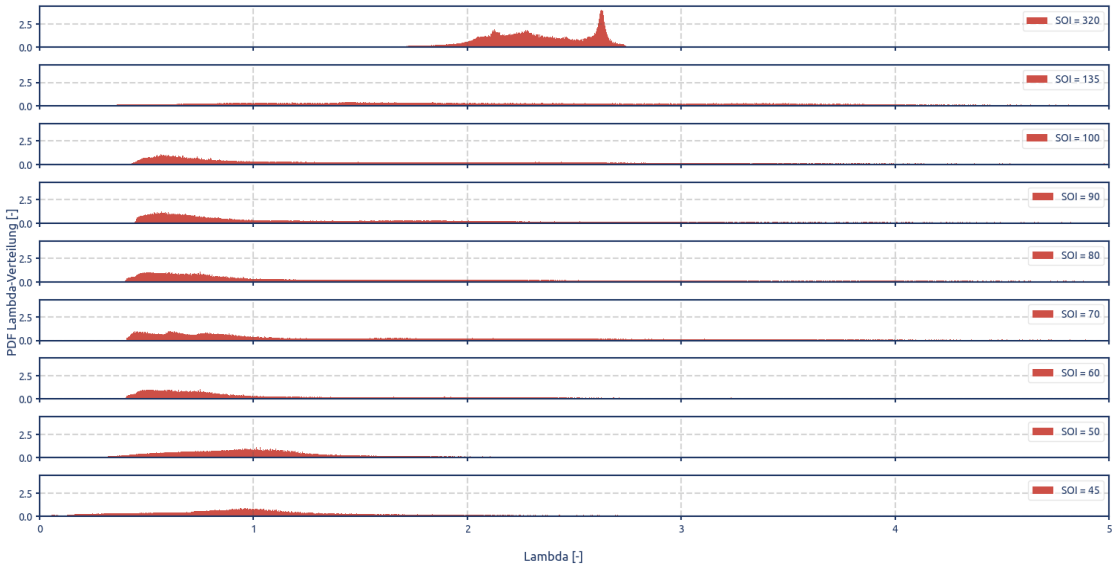

Abbildung 36: Verteilung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses im Brennraum in Abhängigkeit des Eindüse-Timings von relativ früh (320 ° vZoT) bis sehr spät (45° vZOT) als Ergebnis der 3D-CFD-Prozessrechnung

Die motorischen Versuche beim Projektpartner LKV wurden technisch unterstützt. Detaillierte Ergebnisse sind dem Schlussbericht des Partners LKV der Universität Rostock zu entnehmen.

AP 7.2 Potenzialanalyse HD-Gasdirekteinblasung bei DF-Brennverfahren

Das AVL Cruise M Modell wurde auf die HD-Eindüsung erweitert. Dazu wurde das Verbrennungsmodell geändert. Aufgrund der direkten Eindüsung von Gas nach einer gezündeten Piloteinspritzung, findet vorrangig eine diffusionskontrollierte Verbrennung statt. Das bisher für den ND-/MD-Betrieb verwendete Verbrennungsmodell bildet diesen Sachverhalt nicht ab. Deswegen wurde in der 0D/1D-Motorprozessrechnung auf ein mischungsbasiertes Modell umgestellt. Dieses beinhaltet eine kurze Phase der vorgemischten Verbrennung (während des Zündverzugs) und eine Diffusionsverbrennungsphase des Methan-Diesel-Luftgemisches. Das Modell ist für den reinen Dieselbetrieb konzipiert. Durch Anpassung der einzelnen Parameter der Verbrennungsphasen konnten wir eine gute Abbildung des Verbrennungsprozesses im

Dual-Fuel-Model (Methan-Diesel) erzielen (siehe Abb. 35). Das Drehmoment im Modell kam dem Gemessenen sehr nahe ohne das eine große Veränderung des Abwärmemodells vonnöten war.

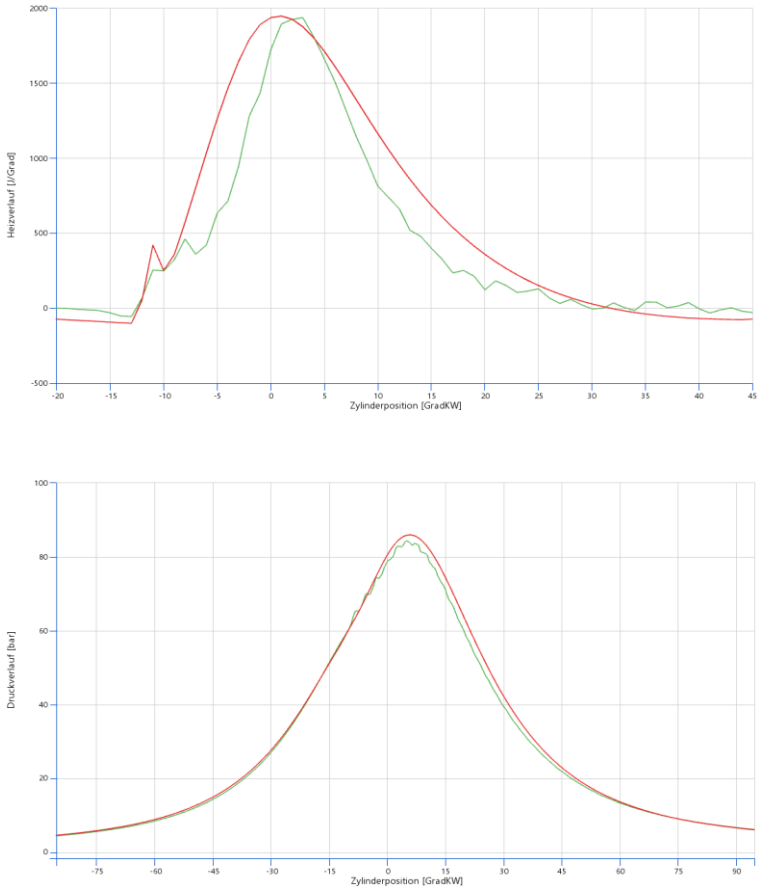

Abbildung 37: Heiz- und Druckverlauf eines exemplarischen Betriebspunktes im HD-Brennverfahren (rot: Simulation, grün: Experiment; 25% Last)

Aus der Parametrierung kann man entnehmen, dass nur ca. 1-2% der gesamten Kraftstoffmasse vor der Hauptverbrennung im vorgemischten Modus verbrennt. Das bedeutet, dass wir fast ausschließlich von einer diffusionsgesteuerten Verbrennung ausgehen können. Ein eingestelltes „Spray Lambda Limit“ von nur 0,35 zeigt auf, dass wir trotz der geringen Reaktionsfreudigkeit von Methan eine gute Flammenausbreitung auch in fette Zonen haben. Diese und andere verbrennungsspezifische Resultate der 0D/1D-Motorprozessrechnung gingen neben rechenaufwendigeren 3D-CFD-Simulationen des Gasjets (Seitens LKV) in die Versuchsplanung am Forschungsmotor ein, sodass eine effiziente Messkampagnengestaltung durchgeführt werden konnte. Die motorischen Versuche beim Projektpartner LKV wurden technisch unterstützt. Detaillierte Ergebnisse sind dem Schlussbericht des Partners LKV der Universität Rostock zu entnehmen.

AP 8 Entwicklung Übertragbarkeitskonzept auf Serienanwendung

AP 9 Bewertung Gesamtkonzept Technologieträger TEME2030+ und der Strukturierung der Ergebnisse

AP 8 und 9 werden der Übersichtlichkeit und thematischer Nähe hier zusammengefasst. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner LKV wurden die Ergebnisse der Messkampagnen strukturiert zusammengefasst und final bewertet. Insbesondere lag der Fokus hier auf einer Bewertung der Einzeltechnologien hinsichtlich einer Treibhausgasreduktion mit Hinblick auf die Ziele des TEME2030+ Projektes, sowie einer technischen Bewertung hinsichtlich der Serientauglichkeit. Es konnte gezeigt werden, dass je nach Anwendungsszenario und Technologiekombination die ursprünglich geplante Reduktion von 30% erreichbar ist. Eine wirtschaftliche Betrachtung wird als nachfolgender Schritt empfohlen. Der Einsatz eines Methanoxidationskatalysators ist stark von der Dauerhaltbarkeit und der Wasser- und Schwefelkompatibilität abhängig. Der Einsatz von Wasserstoff zeigt ein deutliche Reduktionspotential, muss jedoch aufgrund der schwierigen Speicherung an Bord als kritisch betrachtet werden. Nähere Details sind dem Schlussbericht des Partners LKV zu entnehmen.

2.2 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind:

0837 – Personalkosten: 637.757,98 €

Hierin sind sämtliche Arbeitsleistungen für die Vorbereitungen und Messungen am Modellgasprüfstand, Modellentwicklung, Berechnung, Simulation, Datenauswertung, Veröffentlichung und Projektleitungstätigkeiten enthalten. Dieser Posten macht den Großteil der gesamten Projektkosten aus.

0850 – sonstige Vorhabenspezifische Kosten: 46.124,58 €

Dieser Posten beinhaltet insbesondere die Lizenzkosten für die kommerzielle Software „AVL Cruise-M“ von AVL, mit deren Hilfe die 0D/1D-Simulationen des 1-Zylinder-Forschungsmotors durchgeführt wurden.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die in der Einzelvorhabensbeschreibung dargestellten Arbeiten wurden wie geplant im Rahmen des Projektfortschritts abgearbeitet. Die Komplexität der innermotorischen Dual-Fuel Verbrennung mit resultierender Methanemission sowie die Erarbeitung von Strategien zur innermotorischen und nachmotorischen Reduktion dieser Emissionen setzt eine

Kombination aus experimentellen und simulativen Arbeiten voraus. Es konnte in experimentellen Untersuchungen von Methanoxidationskatalysatoren gezeigt werden, dass eine hohe Konvertierungsrate unter bestimmten Randbedingungen möglich ist, die Deaktivierung durch Wasser jedoch bei Standardkatalysatormischungen weiterhin eine Herausforderung ist. Die thermodynamische Analyse der Verbrennung sowie eine auf Basis von Experimenten unterstützte Modellentwicklung und entsprechende Simulationen konnten die Potentiale verschiedener Technologien auf den Methanschlupf aufzeigen. Durch die große Datenbasis des Projektpartners LKV konnte ein Methanschlupfmodell entwickelt werden, welches verschiedene Brennverfahren berücksichtigt und sensitiv gegenüber typischen Freiheitsgraden motorischen Betriebsparameter ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Arbeiten angemessen und erfolgreich waren.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertung im Sinne des Verwertungsplans

Die Ergebnisse des Vorhabens werden zunächst genutzt, um im Rahmen weiterer Veröffentlichungen und Darstellungen auf der Firmenwebsite, Broschüren, etc. die Sichtbarkeit der FVTR GmbH auf dem Gebiet der experimentellen Analyse motorischer Katalysatoren, thermodynamischen Analyse motorischer, komplexer Brennerfahren und Simulation des Motorinnenprozesses, insbesondere unter Verwendung des Kraftstoffes LNG, weiter zu erhöhen. Generell wurde mit Hilfe des Vorhabens die Wettbewerbsfähigkeit der FVTR GmbH auf wissenschaftlicher und technischer Ebene gesteigert. Modernste Methoden und Modelle zur Abbildung komplexer Brennverfahren und Emissionsmodellen wurden entwickelt und können Kunden im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten angeboten werden.

Ebenfalls ist es geplant, dass konkrete Ergebnisse dieses Projektes, z.B. die Methodik zur Vorhersage von Ammoniakschlupf im Rahmen des Verbundvorschungsvorhabens „NH3-Stat“ (FKZ: 03EE5146) weiter zu untersuchen.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Thema der thermodynamischen Analyse und Simulation der Dual-Fuel-Verbrennung ist Gegenstand vergangener und aktueller Forschungsprojekte. Es sind jedoch keine Forschungsergebnisse bekannt, welche sich mit der Modellierung des Methanschlupfes unter Berücksichtigung unterschiedlicher motorischer Technologien und Brennverfahren auseinandergesetzt haben. Somit kann die Aussage getätigt werden, dass keine weiteren Ergebnisse mit dem in diesem Einzelvorhaben definierten Forschungsschwerpunkt von anderen Arbeitsgruppen veröffentlicht wurden.

2.6 Erfolgte bzw. geplante Veröffentlichungen

01.- 02.Dez. 2021	**Heavy-Duty-, On- und off-Highway Motoren 2021, Rostock**
Titel	Analysis and optimisation of the combustion process on a medium-speed dual-fuel single-cylinder research engine using highly fluctuating fuel gas qualities
Autoren	Karsten Schleef, Björn Henke, Sebastian Cepelak, Bert Buchholz, Martin Theile**
06.-08.Sept. 2022	**SAE Powertrains, Fuels and Lubricants Conference and Exhibition, Krakau**
Titel	Combustion Control Strategies for Dual-Fuel Marine Engines Operated with Fluctuating LNG Qualities
Autoren	Karsten Schleef, Björn Henke, Sebastian Cepelak, Manuel Glauner, Jules Dinwoodie, Bert Buchholz, Martin Theile**
12.-16.Juni. 2023	**30th CIMAC Congress, Busan**
Titel	Analysis and optimisation of the combustion process on a medium-speed dual-fuel single-cylinder research engine using highly fluctuating fuel gas qualities
Autoren	Karsten Schleef, Björn Henke, Sebastian Cepelak, Manuel Glauner, Jules Christopher Dinwoodie, Bert Buchholz, Martin Theile**
12.-13.Sept. 2024	**8th Rostock Large Engine Symposium 2024, Rostock**
Titel	3D – CFD Simulation of Direct Gaseous Injection for a Medium Speed Dual-Fuel Engine, doi.org/10.18453/rosdok_id00004649
Autoren	Jules Christopher Dinwoodie, Sebastian Cepelak, Manuel Glauner, Pascal Seipel, Karsten Schleef, Bert Buchholz, Martin Theile**
12.-13.Nov. 2024	**Heavy-Duty-, On- und off-Highway Motoren 2021, Eisenach**
Titel	Numerical Analysis of a Medium Pressure Gaseous Direct Injector on a Marine Medium Speed Dual-Fuel Engine

Autoren	Jules Christopher Dinwoodie, Sebastian Cepelak, Manuel Glauner, Pascal Seipel, Karsten Schleef, Bert Buchholz, Martin Theile**

19.-23.Mai. 2025	**31st CIMAC Congress 2025, Zürich**
Titel	Numerical and experimental analysis of gas DI operation on a medium-speed dual-fuel marine engine, https://doi.org/10.5281/zenodo.15269752
Autoren	Jules Christopher Dinwoodie, Sebastian Cepelak, Manuel Glauner, Pascal Seipel, Karsten Schleef, Bert Buchholz, Martin Theile**

19.-23.Mai. 2025	**31st CIMAC Congress 2025, Zürich**
Titel	Experimental Long-Term Study of a Methane Oxidisation Catalyst on a Medium-Speed Dual-Fuel Engine, https://doi.org/10.5281/zenodo.15191505
Autoren	Pascal Seipel, Manuel Glauner, Jules Christopher Dinwoodie, Karsten Schleef, Bert Buchholz, Robert Bank**

23.-25.Juni. 2025	MARINE 2025, XI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Edinburgh
Titel	A 3D – CFD Analysis of Gas Direct Injection for a Dual-Fuel medium Speed Marine Engine
Autoren	Jules Christopher Dinwoodie, Sebastian Cepelak, Manuel Glauner, Pascal Seipel, Bert Buchholz, Martin Theile**

3 Literaturverzeichnis

[1] Ünal, Ö., Grill, M., Pandurangi, S. et al.: „Modeling of the Combustion Process for a Dual-fuel Diesel System“, MTZ Worldw 80, 140–145 (2019)

[2] Wachtmeister, G.: „Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Ursachen und Reduzierung der CH4-Emissionen in Biogasmotoren; Teilvorhaben 1“, Technische Universität München, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, München, 2016

[3] Gierow, C., Reißig, M., Mieck, S., Koltermann, J.: "KI-basierte Systemmodelle thermischer Komponenten am Beispiel einer drehzahlvariablen Industriedampfturbine", Kraftwerkstechnik 2020

[4] Hariharan, N., Senthil V., Krishnamoorthi, M., Karthic, S.V.: „Application of artificial neural network and response surface methodology for predicting and optimizing dual-

fuel CI engine characteristics using hydrogen and bio fuel with water injection“, Fuel(270), 2020

[5] Bank, R., Etzien, U., Buchholz, B., Töpfer, G., Adrian, T., Harndorf, H.: „Analysis of Field-Aged and Artificially Aged SCR Catalysts for Model Development“, Heavy-Duty-, On- und Off-Highway-Motoren: Global Engineering – 11. Internationale MTZ-Fachtagung, Wiesbaden, 2017

[6] Raab, J., Koschany, F., Döring, A., Watermann, C., Lohmann, H., Kaluza, S., Muhler, M., Hinrichsen, K.-O.: „IMOKAT – Entwicklung eines innovativen Methanoxidationskatalysators zur Senkung der Abgasemission von Schiffen im Gasbetrieb“, Maritime Statustagung 2019

[7] M. V. Jensen, R. F. Cordtz, und J. Schramm, „Numerical analysis of methane slip source distribution in a four-stroke dual-fuel marine engine“, *J. Mar. Sci. Technol.*, Bd. 26, Nr. 2, S. 606–617, Juni 2021, doi: 10.1007/s00773-020-00760-3.

[8] J. C. Dinwoodie *u. a.*, „Numerical Analysis of a Medium Pressure Gaseous Direct Injector on a Marine Medium Speed Dual-Fuel Engine“. MTZ Heavy Duty-, On and -Off Highway Motoren Tagung, Eisenach 2024.

[9] Abaskharon, M., Cepelak, S., Henke, B., Schleef, K., Buchholz, B., “Effect of flexible camshaft technology on dual-fuel engine performance using phenomenological combustion model”, Automotive and Engine Technology, 2023

[10] Y. B. Zeldovich: The Oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions. In: Acta Physicochimica U.S.S.R. Band 21, 1946, S. 577–628.

4 Danksagung

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Rostock, 30.09.2025 Dr.-Ing. Martin Theile