

TEME2030+

Technologieevaluation für Marinemotoren zur Erreichung der THG-Ziele 2030 und folgend

Förderkennzeichen	03SX537C
Projektträger	Projektträger Jülich
Laufzeit des Vorhabens	01.04.2021 – 31.07.2025
Zuwendungsempfänger	Universität Rostock, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen & Verbrennungsmotoren
Autoren	Cepelak, Sebastian Dinwoodie, Jules Seipel, Pascal Glauner, Manuel Buchholz, Bert

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurze Darstellung	6
1.1.	Aufgabenstellung.....	6
1.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens und Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand	13
2.	Eingehende Darstellung	15
2.1.	Verwendung der Zuwendung / Ergebnisse	15
2.1.1	AP 1: Vorbereitung Anpassung Versuchsträger, Prüfstand und Medienversorgung.....	15
2.1.2	AP 2: Grundlagenentwicklung Simulation der DI-Gasbrennverfahren	17
2.1.3	AP 3: Dokumentation Basiszustand für Technologieevaluation	34
2.1.4	AP 4: Analyse der Kurbelgehäuseatmosphäre	35
2.1.5	AP 5: Potenzialanalyse Einzelmaßnahmen ND-Gas-Saugrohreinblasung	40
2.1.6	AP 5.1: Untersuchung veränderlicher Verdichtungsverhältnisse	40
2.1.7	AP 5.2: Technologiepakete zur nachmotorischen Methanreduktion	45
2.1.8	AP 5.3: Nutzbarkeit ausgeweiteter variabler Ventilsteuerzeiten zur Verbrennungsführung 49	
2.1.9	AP 5.4: Potenzialabschätzung AGR-Einsatz bei DF-Brennverfahren	51
2.1.10	AP 5.5: Untersuchung von Optimierungsmaßnahmen des Kolben-Ring-Buchse-Pakets..	58
2.1.11	AP 5.6: Evaluation regenerativer Kraftstoffe für den Einsatz im DF-Motor.....	60
2.1.12	AP 6: Aufbau Teilkonzept Technologieträger TEME2030+.....	65
2.1.13	AP 7: Potenzialanalyse MD- & HD-Gasdirektinblasung bei DF-Brennverfahren	65
2.1.14	AP 8: Entwicklung Übertragbarkeitskonzept auf Serienanwendung	86
2.1.15	AP 9: Bewertung Gesamtkonzept Technologieträger TEME2030+ und Strukturierung der Ergebnisse	88
2.2.	Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	101
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	101
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertung im Sinne des Verwertungsplans.....	102
2.5.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	102
2.6.	Erfolgte bzw. geplante Veröffentlichungen	103
3.	Danksagung	106

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einzylinder Forschungsmotor 1M34DF des LKV der Universität Rostock und relevante Motordaten	9
Abbildung 2: Quellen von Methanemission beim Dual-Fuel-Motor: links: Vorlagerung von Methan im Einlasskanal; rechts: Überspülen von Methan in den Abgaskanal während der Ventilüberschneidung	13
Abbildung 3: Entwicklungszahlen der LNG-betriebenen Schiffsflotte	14
Abbildung 4: Laufbuchse bestückt mit Thermoelementen	16
Abbildung 5: Struktogramm des Gasjet-Targetting-Tools.....	17
Abbildung 6: Vergleich der Resultate der Gasjet-Targeting Tool des LKV mit der gemessenen Eindringtiefe eines Gasinjektors.....	18
Abbildung 7: Vollmotormodell, 6 Zylinder MAK 34DF	18
Abbildung 8: Hochleistungsrechencluster im Serverraum des LKV	20
Abbildung 9: Einbaupositionen und Rechengitter für die Simulation der Injektoren im HD-HT Kammer	20
Abbildung 10: Simulation der Methaneindüsung in der Hochdruck-Hochtemperatur Einspritzkammer	21
Abbildung 11: Vergleich der Eindringtiefe bei verschiedenen Zellengrößen.....	22
Abbildung 12: Kraftstoffdosierung bei ND Verfahren, 100 % Last.....	23
Abbildung 13: Homogenisierung des Kraftstoff-Luft Gemischs im Einlasstakt, ND-Verfahren, 100 % Last	23
Abbildung 14: Homogenisierung im Kompressionstakt, ND-Verfahren bei 100 % Last.....	24
Abbildung 15: Form der Gaswolke bei unterschiedlichen Eindüsebeginn im Einlasstakt, 100 % Last .	25
Abbildung 16: Eindüsungen im Kompressionstakt, MD - Verfahren, 100 % Last.....	26
Abbildung 17: Eindringtiefe und Kegelwinkel bei verschiedenen Einblasezeitpunkten, MD-Verfahren, 100 % Last.....	27
Abbildung 18: Coandă Effekt bei später Einblasung, ND Verfahren, 100 % Last	27
Abbildung 19: Lambda-Verteilungen verschiedener Eindüsungen, MD-Verfahren, 100 % Last	28
Abbildung 20: Lambda-Verteilungen verschiedener Eindüsungen, MD-Verfahren, 50 % Last	28
Abbildung 21: Entwicklungsprozess Schichtladungskolbenoberteil für MD-Verfahren	29
Abbildung 22: Schichtladung bei 50 % und 100 % Last, MD - Verfahren	29
Abbildung 23: Lambda-Verteilung im Brennraum um 10 °KWvOT bei verschiedenen Eindüsezeitpunkten, MD-Schichtladungsverfahren bei 50% Motorlast	30
Abbildung 24: Lambda am Ende der Eindüsung, HD-Verfahren ohne Strahlführung, 50 % Last.....	31
Abbildung 25: Lambda am Ende der Eindüsung, HD-Verfahren mit Strahlführung, 50 % Last.....	31
Abbildung 26: Simulierte und experimentelle Druckverläufe, ND, MD, HD	32
Abbildung 27: Brennraumtemperaturen bei den verschiedenen Brennverfahren ND, MD-Schichtladung, HD, 50 % Last	33
Abbildung 28: Nachweis der Anwendbarkeit des Regelungskonzeptes bei einer Veränderung der Brenngaszusammensetzung (MZ = 79 → 53)	35
Abbildung 29: exemplarische Tagesverlaufsmessung von Prüfstandsmessgrößen zur Beschreibung der Kurbelgehäuseatmosphäre	37
Abbildung 30: Versuchsaufbau (Setup) mit GasMOS- H2 Prototyp (rechts) am Einzylinderprüfstand des LKV	37
Abbildung 31: Analyse und Validierung der Kurbelgehäuse-Atmosphäre im MD-Homogen-Brennverfahren (oben, 50 % Last, steigende H ₂ -Zumischung, dann spätere Gaseinblasung) sowie im ND-Brennverfahren (50 % Last, steigende H ₂ -Zumischung, dann 100 % Last und sinkende H ₂ Zumischung)	38

Abbildung 32: Tagesverlaufsdatei zur Analyse der Kurbelgehäuseatmosphäre im MD-Schichtladungsbrennverfahren	39
Abbildung 33: Ergebnis der Messungen der Kurbelgehäuseatmosphäre mit dem GasMOS System sowie einem Gaschromatographen als Referenz.....	40
Abbildung 34: Ergebnisse des OD/1D Klopfmodells für verschiedene Lastpunkte in Abhängigkeit des Verdichtungsverhältnisses	41
Abbildung 35: Vergleich zwischen OD/1D Simulation und Messungen nach Optimierung/Validierung des Motormodells	42
Abbildung 36: Einfluss des Verdichtungsverhältnisses basierend auf Variationen des Verbrennungsschwerpunkts bei unterschiedlichen Pilotkraftstoffmengen bei 50 % Motorlast.....	43
Abbildung 37: Einfluss des Verdichtungsverhältnisses basierend auf Variationen des Luftverhältnisses bei 50 % Last.....	45
Abbildung 38: Installierte Abgasstrecke mit Isolierung.....	46
Abbildung 39: Abgas-Wechseinrichtung zur Abgasentnahme an verschiedenen Entnahmestellen .	46
Abbildung 40: Schaltbild der installierten Abgasstrecke inkl. der Abgasmessung.....	47
Abbildung 41: Bestimmung der Light-Off Temperatur	48
Abbildung 42: Deaktivierung des Katalysators in Abhängigkeit der Zeit	49
Abbildung 43: Angebaute FCT-Einheit links, Mehrsegment-Nockenwelle rechts	50
Abbildung 44: Methodik zur simulativen Prüfung der Einflüsse eines variablen Ventiltriebs	50
Abbildung 45: Testmatrix für diverse Nockenwellenpaare.....	51
Abbildung 46: RI-Fließschema der AGR-Strecke inklusive Sensorik.....	53
Abbildung 47: AGR-Strecke ohne Verrohrung der Gasleitungen (links) sowie mit Verrohrung und Isolierung (rechts).....	53
Abbildung 48: Auswirkungen einer AGR-Rate von 15 % bzw. 25 % auf die Luftmassenströme und den Wirkungsgrad	54
Abbildung 49: Auswirkungen der AGR-Rate auf die Emissionen im ND-Brennverfahren bei 50 % Motorlast.....	55
Abbildung 50: Änderung des O ₂ -Gehalts im Abgas, von Lambda, dem Variationskoeffizienten des Mitteldrucks sowie des Wirkungsgrades bei steigender AGR-Rate	56
Abbildung 51: CH ₄ -NO _x Trade-Off bei verschiedenen Kraftstoff-Luftverhältnissen und AGR-Raten ..	56
Abbildung 52: Emissionen bei unterschiedlichen Ladeluftdrücken und AGR-Raten	57
Abbildung 53: Emissionen in Abhängigkeit des Verbrennungsschwerpunktes und verschiedenen AGR-Raten	58
Abbildung 54: Lastabhängigkeit der Laufbuchsentemperaturen.....	59
Abbildung 55: Einfluss von Wasserstoffzumischung auf Laufbuchsentemperatur.....	59
Abbildung 56: Wasserstoffpfad innerhalb der Gasmischstrecke	60
Abbildung 57: Wasserstoffpfad innerhalb der Gasmischstrecke	61
Abbildung 58: Wasserstoffchromatograph	61
Abbildung 59: Zusammenhang von volumetrischem, energiebezogenen und massebezogenen Wasserstoffanteilen bei Zumischung zu Erdgas aus dem öffentlichen Erdgasnetz	62
Abbildung 60: Untersuchung des Einflusses der Wasserstoffzumischrate auf die wichtigsten Kenngrößen hinsichtlich Verbrennungscharakteristik und Emissionen bei verschiedenen Lastpunkten	62
Abbildung 61: Einfluss von Schwerpunktlage und Lambda auf die Emissionen bei 50 % Last	63
Abbildung 62: Analyse des Einflusses des Pilotkraftstoffs Schwerpunktvariationen bei 50 % Last mit 4,5 m.-% Wasserstoffzumischung	64
Abbildung 63: Einfluss des Pilotkraftstoffs auf den Heizverlauf anhand von zwei Verbrennungsschwerpunktvariationen bei Verwendung von HVO bzw. Dieselpilotkraftstoff mit konstanter	

Einspritzmenge und ansonsten vergleichbaren Betriebsparametern (50 % Motorlast; 2,05 bara Ladedruck; ca. 60 mg/ASP Pilotmenge; 4,5 Ma.-% H ₂ -Zumischung).....	65
Abbildung 64: Prototyp von den Firmen DUAP AG / ITAZ GmbH entwickelte DI-Gas-Injektor	66
Abbildung 65: Einblaseverlaufsindikator mit MPDI-Injektor; links: Schematische Darstellung mit Injektor- & Messkammerflansch (blau) sowie Zusatzvolumen (grün); rechts: Prüfstands Aufbau mit Gaszufuhr Lanze und angeschlossener Peripherie	67
Abbildung 66: Hochdruck-Hochtemperatur-Einspritzkammer der Universität Rostock; links: Schematische Darstellung mit möglichen Injektor-Positionen für Spraybilduntersuchungen, rechts: Gesamt auf Aufbau mit Kamerasystemen	68
Abbildung 67: Beispielhafte Darstellung eines quantitativ aufgelösten Vergleichs zwischen Hochdruck- & Mitteldruck-Injektor zu unterschiedlichen Ansteuerdauern	70
Abbildung 68: Beispielhafte Darstellung eines zeitlich aufgelösten Vergleichs zwischen Hochdruck- & Mitteldruck- Injektor zu unterschiedlichen Gasdruckniveaus	71
Abbildung 69: Beispielhafte Darstellung eines quantitativ aufgelösten Vergleichs von idealisierter & prüfstandsnaher Verrohrung bei unterschiedlichen Gegendruckniveaus	72
Abbildung 70: Auswertungen HDHT-Kammeruntersuchungen; Visuelle Darstellung der Gasausbreitung bei unterschiedlichen Vordrücken	73
Abbildung 71: Systematische Auswertung der Sprayparameter in Form von Eindringtiefe und Ausbreitungswinkel	74
Abbildung 72: Vergleich der Eindringtiefe und Form der Eindüsung, Simulation vs. HD-HT Kammer .	74
Abbildung 73: HD-Brenngasverdichter (l.) und Druckregelstrecke im Prüfstand (r.).....	75
Abbildung 74: Dampfdruckkurve von Methan stellvertretend für LNG mit Markierung für den kritischen Punkt (-82,6 °C; 46 bar)	77
Abbildung 75: Variationen des Einblastimings bei 50 % Motorlast	78
Abbildung 76: Analyse zum Einfluss des Gasdrucks bei MD-SL bei 50 % Motorlast	79
Abbildung 77: Vergleich der verschiedenen Brennverfahren ND, MD-H und MD-SL bei 50 % Last.....	80
Abbildung 78: Vergleich der unterschiedlichen Brennverfahren ND, MD-H & MD-SL anhand von Lambdavarationen bei 50 % Last. In grau gepunktet im Diagramm CH ₄ sind die Basis-Messpunkte für den Vergleich in der kommenden Abbildung kenntlich gemacht.....	80
Abbildung 79: Vergleich der THG-Emissionen der verschiedenen Brennverfahren ND, MD-H & MD-SL	81
Abbildung 80: Erhöhung der Ansteuerdauer des HD-Injektors (l.) bzw. des Gasdrucks (r.) zur Anhebung der Motorlast.....	82
Abbildung 81: Resultate der beiden Parametervariationen aus Abbildung 80 über den indizierten Mitteldruck stellvertretend für die Motorlast dargestellt.	83
Abbildung 82: Lastvariationen im HD-Brennverfahren von ca. 20 % bis 60 % Motorlast ausgewählter Betriebspunkt bei 50 % Last (grün) für den folgenden Vergleich der unterschiedlichen Brennverfahren	84
Abbildung 83: Vergleich der CH ₄ /NOX/THG Emissionen der verschiedenen Brennverfahren bei 50 % Last	85
Abbildung 84: Bewertung der Kombination unterschiedlicher Technologiekonzepte	97
Abbildung 85: Übersicht über das THG-Reduzierungspotenzial der einzelnen Technologiekonzepte bzw. der Kombination mehrerer Technologien	98
Abbildung 86: Übersicht über das CO ₂ /CH ₄ Reduzierungspotenzial der Brennverfahren MD-SL (Basis und emissionsoptimiert) sowie HD	99

1. Kurze Darstellung

1.1. Aufgabenstellung

Aktuelle Situation

Projektziele

Das Hauptziel des beantragten Forschungsvorhabens ist die

„Reduktion der THG-Emissionen maritimer Gasmotoren um 35% mittels der Anwendung von Brennverfahrens- und Abgasnachbehandlungskonzepten auf Basis von bis zum Jahr 2030 verfügbarer Technologien“

Dieses Hauptziel unterstützt die Universität Rostock durch die folgenden Forschungsleistungen maßgeblich.

Für den Lehrstuhl bedeutet dies die experimentelle Umsetzung und wissenschaftliche Analyse der nachfolgenden Technologien an einem hochmodernen Forschungsmotor und parallel dazu in der Simulationsumgebung:

- Experimentelle Analyse der Konvertierungsleistung eines neuartigen Methan-Oxi-Katalysators mit realem Motorabgas und Bestimmung der optimalen Systemanpassung zwischen Brennverfahren und Katalysator
- Untersuchung der Auswirkung zukünftiger Wasserstoff-Zumischungen zum Brenngas mittels eines zusätzlichen Wasserstoffpfads in der vorhandenen Gasmischstrecke
- Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen zu direkteingasenden Brennverfahren für Schiffsmotoren durch experimentelle Analysen mit einer neu zu erstellenden HD-Gasversorgung an einem Einzylinder-Forschungsmotor mit Gas HD-Einblasung
- Simulation der Gemischbildung, Zündvorgänge und der Kraftstoffumsetzung während der DI-Verbrennung (Direktinjektion)
- Untersuchung der direkteinblasenden Injektortechnologie in Hochdruckkammer und Gas-EVI (Einblasratenverlaufsindikator)

Dabei sind die übergeordneten Ziele wie folgt definiert:

- Praktische Realisierung des theoretischen THG-Vorteils von Methan durch drastische Reduzierung des Methanschlupfes um mindestens 90% gegenüber dem in Serie befindlichen ND-Gasbrennverfahren mit äußerer Gemischbildung
 - als ambitioniertes Forschungsziel sollen Methan-Emissionen kleiner 0,5 g/kWh bei optimiertem Brennverfahren und Verwendung eines Methan-Oxi-Kats erreicht werden, als Ziel für die Rohemissionen wird am konkreten Versuchsträger ein Wert kleiner 1 g/kWh festgelegt
- Entwicklung und Anpassung von Messgeräten und Messmethoden zur Bestimmung der realen Einblaseraten von HD-Gas Einblaseventilen
- Laseroptische Analyse der Strahlausbreitung und Gemischbildung bei Hochdruck-Gasdirektinblasung unter Nutzung einer Hochdruck-Hochtemperaturkammer
- Bestimmung der Auswirkung von zukünftigen Zumischungen regenerativen Wasserstoffs zum fossilen Brenngas, Analyse der Auswirkungen auf Klopfverhalten, Wirkungsgrad, Regelanforderungen sowie Emissionen mit dem Ziel einer zulässigen Zumischquote von 10% Wasserstoff (energiebezogen) zum Erdgas
- Systemintegration auf Basis der analysierten Technologiepakete am Versuchsträger zur Darstellung der bei optimaler Systemabstimmung erreichbaren maximalen THG-Einsparungen und des dazu notwendigen technischen Aufwands (best practice)
- Darstellung eines 100% CO₂-neutralen Prüfstandsbetriebes in einer Messkampagne unter Einsatz von regenerativ erzeugtem Brenngas (SNG, Bio-Methan bzw. methanbasiertes Synthesgas) sowie PtL-Pilotkraftstoff zur Überprüfung der Anschlussfähigkeit der erarbeiteten Forschungsergebnisse

- Für alle Untersuchungen und Optimierungsmaßnahmen gilt stets die Einhaltung der IMO Tier III Grenzwerte für jedes untersuchte Brennverfahren
 - Für den konkreten Versuchsträger bedeutet dies als Engineering-Ziel $< 2 \text{ g/kWh NO}_x$
- Vorhersage des Gemischbildungs- und Brennverhaltens bei MD- und HD- Direkteinblasung unter Verwendung von 3D-CFD Simulationsmodellen basierend auf tabellierter Chemie

Das beantragte Projekt nimmt in folgenden Punkten Bezug zu den förderpolitischen Zielen:

1. Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen und Forschungsstellen durch

- Erweiterung des Know-hows über die ablaufenden chemisch-physikalischen Prozesse und Zusammenhänge bei Gemischbildung, Zündung, Verbrennung und Schadstoffentstehung bei DI-Gasbrennverfahren (hohes Maß an Wissenstransfer im Projektverbund, Übertragbarkeit auf andere Produkte)
- Erleichterung strategischer Forschungsausrichtung auf Basis der erzielten Forschungsergebnisse
- Netzwerkbildung zwischen der Universität Rostock und den beteiligten Wirtschaftsunternehmen
- Einsatz und Weiterentwicklung leistungsfähiger und vergleichsweise kostengünstiger Entwicklungswerkzeuge (Einzylinder-Forschungsmotor und Simulation)
- Erweiterung des Forschungsportfolios (Direktinjektions-Gasbrennverfahren)
- Schaffung leistungsstarker Versuchseinrichtungen als Voraussetzung für die Akquise zukünftiger anspruchsvoller Forschungsprojekte
- Erhöhung der wissenschaftlichen Reputation, Festigung der Universität Rostock als kompetenter Partner auf dem Gebiet der Schiffsmotoren unter Einsatz konventioneller als auch alternativer Brennstoffe

2. Ausbildung leistungsfähiger Nachwuchskräfte durch

- Nutzung eines Einzylinder-Forschungsmotors am LKV als zentrale experimentelle Plattform zur Analyse der von den Projektpartnern bereitgestellten Versuchsbauteile und Technologien
- Einblick in aktuelle Forschungs- und Entwicklungstrends im Bereich der Großmotoren sowie in die verwendeten Forschungswerkzeuge und Methoden
- Einbindung von Studenten und Absolventen in die Forschungsarbeiten (Bachelor-, Studien-, Masterarbeiten, Promotionen, wissenschaftliche Hilfsarbeiten)
- Langfristige Absicherung einer hohen Ausbildungsqualität durch Schaffung leistungsstarker Versuchseinrichtungen
- Integration neuester Erkenntnisse und F&E-Ergebnisse in die Lehre als Grundlage für optimal ausgebildete Ingenieure (z.B. Sondervorlesungen mit Bezug zu laufenden Projekten – Verfahren bereits jetzt an der Universität Rostock etabliert)
- Möglichkeit der Vermittlung von Praktikanten- und Masterarbeitsplätzen innerhalb des Projektverbundes

3. Verkürzte Innovationszyklen durch

- Gezielten Einsatz und Weiterentwicklung leistungsfähiger und kostengünstiger Simulations-Entwicklungswerkzeuge (3D-CFD- sowie 0D/1D-Simulationswerkzeuge und -modelle)
- Aufbau einer modularen Versuchsträgerplattform zur Technologieevaluation auf Basis eines Einzylinder Forschungsmotors

4. Erhöhung der Wertschöpfung am Standort Deutschland durch

- Erforschung wissenschaftlicher Grundlagen für neue Produkte und Technologien; Ausbau des Vorsprungs bei Gasbrennverfahren
- Stärkung der Entwicklungsabteilungen (neue Erkenntnisse über verfügbare Entwicklungswerkzeuge, Zugang zu leistungsfähigen Versuchseinrichtungen)
- Erweiterung des Forschungsportfolios

5. Fachliche Qualifikation der Antragsteller durch

- Wissenstransfer zwischen Projektpartnern
- Promotionsmöglichkeit für die in die Forschungsarbeiten eingebundenen Wissenschaftler an der Universität Rostock

6. Sicherung anspruchsvoller Ingenieursarbeitsplätze

- 4 Ingenieure und 2 Techniker für 4 Jahre an der Universität Rostock
- Sicherung von Arbeitsplätzen durch zukünftige Erweiterung des Forschungsportfolios

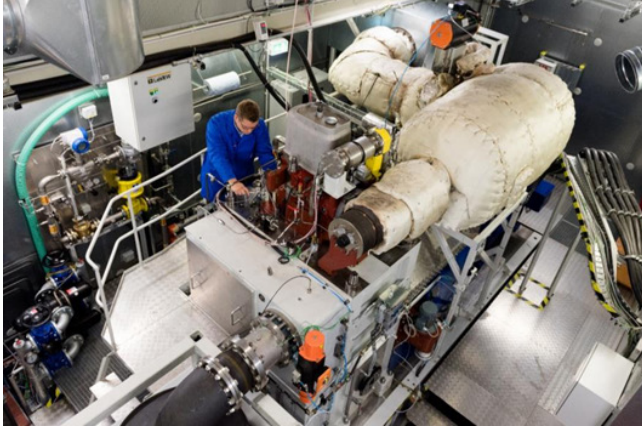
7. Unterstützung klimapolitischer Ziele der Bundesregierung durch

- Senkung von THG-Emissionen durch den Einsatz von Brenngasen anstelle von Marinedestillaten und Schwerölen (günstigeres H/C-Verhältnis)
- Senkung des Schadstoffausstoßes (NO_x, SO_x, PM, CH₄, CO₂) durch die Erforschung neuester Gas-Brennverfahrenskonzepte
- Senkung von THG-Emissionen durch zukünftige Nutzbarkeit regenerativ erzeugter SynGase oder Biogase als Brenngas für die untersuchten Brennverfahren

Diese Ziele wurden vollständig erreicht.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Als motorische Versuchsträger diente der 1/34DF Forschungsmotor des LKV der Universität Rostock. Dieser Motor ist als 1-Zylinder Forschungsmotor ausgeführt und basiert auf dem Dual-Fuel Motor der Serie M34DF des Motorenherstellers Caterpillar Motoren GmbH und Co. KG in Kiel. Der Motor findet als Vollmotor z.B. Anwendung in Fähren und Kreuzfahrtschiffen. Details können der in Abbildung 1 enthaltenen Tabelle entnommen werden.



Forschungsmotor 1M34DF

Bohrung	340 mm
Hub	460 mm
Power	> 500 kW
Nenn Drehzahl	720 $\frac{1}{min}$
Zünddruck	> 200 bar

Abbildung 1: Einzylinder Forschungsmotor 1M34DF des LKV der Universität Rostock und relevante Motordaten

Fachliche Kompetenz

Die ausführenden Forschungsstellen LKV und FVTR GmbH kooperieren seit vielen Jahren erfolgreich auf dem Gebiet der Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlung. LKV betreibt insbesondere experimentelle, anwendungsnahe Forschung im Bereich der Verbrennungsmotoren. Die FVTR GmbH, die als ein Spin-Off der Universität Rostock im Jahr 2007 durch erfahrene Mitarbeiter ausgründet wurde, verfügt über viel Know-how bzgl. modernster 0D- und 3D-Simulationsverfahren, Emissions-senkungsmaßnahmen sowie dem Einsatz von Sonderkraftstoffen bei Schiffsdieselmotoren. Darüber hinaus existieren umfangreiche praktische Erfahrungen beim Betrieb von Großmotoren sowohl als Vollmotor als auch als 1-Zylinder Versuchsaggregat.

Die in das Verbundprojekt eingebundenen Projektpartner repräsentieren anerkannte, etablierte Unternehmen und Forschungsstellen mit unterschiedlichen Arbeitsschwerpunkten.

Der Projektpartner Schaller Automation produziert und entwickelt Ölnebel-Detektionssysteme für einen sicheren Betrieb von Diesel-, Gas- und Dual-Fuel-Motoren. In mehr als 50 Jahren Unternehmensgeschichte wurden weltweit über 54.000 Motoren mit Sicherheitssystemen der Firma Schaller ausgerüstet. Mit seinen mehr als 70 Mitarbeitern sowie vielen engen Kooperationen mit verschiedenen Universitäten und Forschungsinstituten hat sich die Schaller Automation zum Weltmarktführer im Bereich Ölnebel-Detektionssysteme entwickelt.

Mit den assoziierten Partnern KS Large Bore Pistons, Kompressorenbau Bannewitz, M. Jürgensen, SICK sowie Umicore beteiligen sich darüber hinaus namhafte deutsche Unternehmen, die erfolgreich hochwertige Komponenten und Systeme für Großmotoren produzieren.

Die KS Large Bore Pistons Group gehört zu den weltweit führenden Herstellern von Großkolben. Das Unternehmen bietet optimale Lösungen für Kolben im Durchmesser von 130 bis 640 mm aus Stahl und Aluminium und für alle Anwendungsbereiche. Neben Kolben für Anwendungen mit konventionellem Kraftstoff können Lösungen für alternative Brennstoffe wie Wasserstoff, Ammoniak oder Methanol angeboten werden.

Die Kompressorenbau Bannewitz GmbH (KBB) entwickelt, fertigt und vertreibt Abgasturbolader mit Axial- und Radialturbinen zur Aufladung von mittelschnelllaufenden Diesel- und Gasmotoren im Leistungsbereich von 500 bis 4.800 kW für den Schiffs-, Lokomotiv- und Industrieinsatz. Die Abgasturbolader kommen ebenso auf Motoren in Generatoranlagen zur Anwendung.

M. Jürgensen ist ein weltweit führender Hersteller von Zylinderlaufbuchsen aus Grauguss für mittelschnelllaufende Viertakt-Motoren. Mit ihrer fundierten Expertise der Materialentwicklung und Oberflächentechnologie fertigen sie seit 1937 qualitativ herausragende Zylinderlaufbuchsen im Schleudergussverfahren.

Als Technologie- und Marktführer schafft SICK mit Sensorintelligenz und Applikationslösungen die perfekte Basis für sicheres und effizientes Steuern von Prozessen, für den Schutz von Menschen vor Unfällen und für die Vermeidung von Umweltschäden.

Umicore verfügt über ein umfassendes Portfolio an fortschrittlichen Katalysator Technologien und ein kompetentes und erfahrenes Team von Ingenieuren und Chemikern, die effiziente technische Lösungen entwickeln und demonstrieren. Umicore entwickelt branchenführende Abgaskatalysator Technologien für die Bewertung und Anwendung in On- und Off-Road-, Schiffs- und Schienenmärkten.

Infrastrukturelle Voraussetzungen

Aufgrund der langjährigen Aktivitäten im Bereich der Großmotorenforschung besitzt der LKV hervorragende experimentelle Voraussetzungen und Erfahrungen zur Bearbeitung des Projektes. Hervorzuheben ist insbesondere der mittelschnelllaufende 1-Zylinder Forschungsmotor, der im Rahmen der BMW-geförderten Projekte „LEDF Konzepte“ (FKZ: 03SX369A) und „LEDF Konzepte 2“ (FKZ: 03SX421A) aufgebaut und erweitert wurde (ca. 4 Mio. € Investitionskosten) und weltweit eines der modernsten existierenden Aggregate dieser Größenordnung darstellt. Über eine 4 Quadranten-Leistungsbremse können sämtliche Lastzustände im Generator- oder Propellerbetrieb nachgestellt werden. Neben Triebwerk und Bremse besitzt der Prüfstand eine leistungsstarke Kompressoreinheit mit einer elektrischen Anschlussleistung von 500 kW, welche Ladeluftdrücke bis 9 bar bei Volllast ermöglicht. Weitere Einrichtungen betreffen eine 78 kW Ladeluftkonditionierung, einen Erdgaskompressor sowie einen Kühlturm mit 1,2 MW Kühlleistung. Darüber hinaus existieren neben mehreren kleinen PKW-Motorprüfständen ein weiterer schweröltauglicher 1-Zylinder Forschungsmotor (Bohrung 150 mm), ein 6-Zylinder mittelschnelllaufender Vollmotor vom Typ Caterpillar MaK 6M20 (Bohrung 200 mm) sowie ein moderner schnelllaufender 1-Zylinder Forschungsmotor, die zum Teil in Kooperation mit verschiedenen Industriepartnern betrieben werden. Das Maschinenlabor des LKV ist weiterhin mit umfangreicher Abgasmesstechnik sowie einem eigenen Betriebsstofflabor ausgerüstet, welches auf die Kraft- und Schmierstoffanalytik spezialisiert ist.

Trotz der umfangreichen Ausstattung mussten für die Bearbeitung des Projektes weitere projektbezogene Investitionen getätigt werden. Diese umfassten im Wesentlichen:

- HD-Gasinfrastruktur
- MD- / HD-Gasinjektoren
- Prüfstandsmess- und Steuerungstechnik
- Erweiterungen Komponentenprüfstände (Einblasratenverlaufsindikator und optische HD-HT-Einspritzkammer)
- Erweiterung Rechencluster zur Durchführung der geplanten 3D-CFD-Simulationen

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die folgende Tabelle zeigt den Forschungsverbund. Partner waren neben dem Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren (LKV) der Universität Rostock auch die FVTR GmbH und Schaller Automation. Des Weiteren waren als assoziierte Partner KS Kolbenschmidt GmbH, Kompressorenbau Bannewitz GmbH, M.JÜRGENSEN, Umicore AG und SICK AG im Forschungsverbund integriert.

Das Verbundvorhaben wurde in Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern, insbesondere in enger Abstimmung mit der FVTR GmbH, durchgeführt. Der Gesamtarbeitsplan umfasste drei Projektsäulen (ND/MD/HD), wobei der LKV einen wesentlichen Anteil an allen Arbeitspaketen hatten.

Die Koordination unterlag dem LKV der Universität Rostock gemeinsam mit der FVTR GmbH. Es wurden regelmäßige Besprechungen bzw. Telefonkonferenzen zur engen Abstimmung koordiniert. Im Rahmen von Arbeitstreffen fand ein Austausch zwischen den Projektpartnern statt.

Die Untersuchung des Dual-Fuel Brennverfahrens und die Entwicklung neuester verbrennungstechnischer Konzepte startete zu Projektbeginn mit einer intensiven Anpassung des Versuchsträgers und der Medienversorgung. Hier lieferte SICK einen Sensor zur Bestimmung der Gaszusammensetzung in der angepassten Gasmischstrecke. Durch die Basisvermessung des Versuchsträgers konnte der Ist-Zustand nach den

Infrastrukturänderungen aufgenommen werden. In dieser Phase wurden ersten 3D-CFD Modellen getestet um die Eignung des Programms AVL Fire M für das Vorhaben zu überprüfen. Aufgrund der hier durchgeführten Arbeiten wurden viele wichtige Erkenntnisse zur Simulation des Motorinnenprozess bei direkteinblasende Gasinjektoren gemacht, die zum späteren Erfolg der Simulationskampagnen führten. Hierbei hat auch die FVTR GmbH maßgeblich mit ihrem Know-How beigesteuert.

Neben den Messungen zu den Niederdrucktechnologien wurden die Spezifikationen und Lastenheften für den Mittel- und Hochdruckinjektoren festgelegt. Nach der Spezifikation und Bereitstellung der CAD Dateien zu den Injektoren konnten diese verwendet werden, um Rechengitter für die 3D-CFD Simulation zu erstellen. So konnte vor Übergabe der Injektoren bereits mithilfe der Simulation Betriebsstrategien und optimale Hardwarekonfigurationen identifiziert werden. Zwischen LKV und FVTR GmbH gab es einen regen Austausch zur Entwicklung der 3D-CFD Modelle seitens des LKV und des Methanschlußmodells seitens der FVTR.

Der LKV lieferte auch Randbedingungen in Form von ausgearbeiteten Messreihen für die Simulation und Vorentwicklung des Wasserstoffselektiven Gassensors der Firma Schaller Automation. Durch (mindestens) monatliche Treffen wurde über die gesamte Projektlaufzeit der Fortschritt der Entwicklung beschleunigt. An diesen Treffen war auch KS Large Bore Pistons beteiligt, da es inhaltlich um die Kurbelgehäuseatmosphäre ging. Mit Schaller Automation wurden mehrere Messkampagnen am Versuchsmotor gefahren, um Randbedingungen zu liefern oder im späteren Projektverlauf den entwickelten Prototypen zu testen. Schaller Automation stellte auch diverse Sensoren zur Sicherheitsüberwachung des Versuchsträgers.

Bei der Erstellung des Vollmotormodells unterstützte die FVTR GmbH mit ihrem Know-How zum 0D/1D Simulation des Prüfstands sowie KBB durch Bereitstellung eines geeigneten Turboladerkennfeldes.









Die Firma M.JUERGENSEN lieferte in Absprache mit dem LKV eine Laufbuchse mit Bohrungen für Thermoelementen, um Einblicke über die Temperatur in der Laufbuchse bei den verschiedenen Verfahren und bei Wasserstoffzumischungen zu gewinnen. Dieses Bauteil wurde am LKV mit Thermoelementen bestückt und lieferte außerdem gute Randbedingungen für die 3D-CFD Simulation.

Beim Prüfstandsumbau wurde ebenfalls der Abgastrakt angepasst um Katalysatoren zu testen. Umicore lieferte Katalysatorenbricks für die Testung am Synthesegasprüfstand der FVTR GmbH und für den Motorprüfstandsbetrieb am LKV.

KS Large Bore Pistons lieferte Kolbenoberteile für Versuche am Forschungsmotor z.B. zum Thema Auswirkung von Wasserstoffzumischungen auf Kolbenoberteile. Nach der Vorentwicklung durch die 3D CFD Modelle des LKV wurde für das Mitteldruckverfahren ein Kolbenoberteil konstruktiv entworfen und gefertigt.

Durch vierteljährliche Online-Treffen und mindestens jährliche Projekttreffen mit allen Projektpartnern konnten die Netzwerke der Projektpartnern gestärkt und ein systematischer Abgleich des jeweiligen Fortschritts gewährleistet werden.

Die generierten Projektdaten und Messreihen wurden während der gesamten Projektlaufzeit systematisch archiviert sodass sie den Projektpartnern jederzeit zur Verfügung standen.

Partner	Aufgabe	Bereitstellung
	Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren (LKV), Universität Rostock	<ul style="list-style-type: none"> • Modifikation Motor und Prüfstand • Wissenschaftliche Bearbeitung des Projektes • Schwerpunkt: Experimentelle Untersuchungen (Motor, Komponentenprüfstände) • CFD Simulation
	Schaller Automation Industrielle Automationstechnik GmbH & Co. KG	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung Wasserstoffsensoren für Kurbelgehäuseüberwachung • Unterstützung bei sicherheitsgerichteter Überwachung des Forschungsmotors (Ölnebel detektion, Methankonzentration, Wasserstoffkonzentration)
	FVTR GmbH	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung bei Prüfstandsplanung, Projektierung und Prüfstands-aufbau sowie Erweiterung Prüfstandssteuerung und Motorsteuergerät • Wissenschaftliche Bearbeitung des Projektes (0/1D -Modellierung)
	KS Large Bore Pistons Germany GmbH	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung bei Auslegung von Kolbenvarianten • Fertigung ausgewählter Kolbenvarianten
	Kompressorenbau Bannewitz GmbH	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung von Turboladerkennfeldern für die Adaption von zweistufigen Aufladekonzepten am Einzylinder-versuchsträger
	M. JÜRGENSEN GmbH & Co KG	<ul style="list-style-type: none"> • Fertigung Laufbuchse mit Temperaturmessstellen
	Umicore AG & Co. KG	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung Methanoxida-tionskatalysator
	SICK AG	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor zur Analyse der Gaszusammensetzung auf Basis der Messung der Schallgeschwindigkeit

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Stand der Technik für Marineanwendungen mit mittelschnelllaufenden Dual-Fuel-Motoren ist das Niederdruck-Gasbrennverfahren mit äußerer Gemischbildung. Hierbei wird das Brenngas LNG (Liquified Natural Gas) unmittelbar vor dem Einlassventil in den Ladeluftkanal zylinderindividuell eingeblasen. Während des Ansaug- und Verdichtungstaktes wird eine nahezu homogene Gemischbildung mit der Ladeluft erreicht. Die Zündung erfolgt mit Hilfe der Einspritzung einer kleinen Menge flüssigen Kraftstoffs, der zur Selbstzündung gebracht wird. Der bei diesem Verfahren typische Methanschluß setzt sich aus zwei Hauptquellen zusammen. Zum einen kommt es während der Ventilüberschneidungsphase zum Überspülen von Erdgas aus der Frischladung in den Abgastrakt.

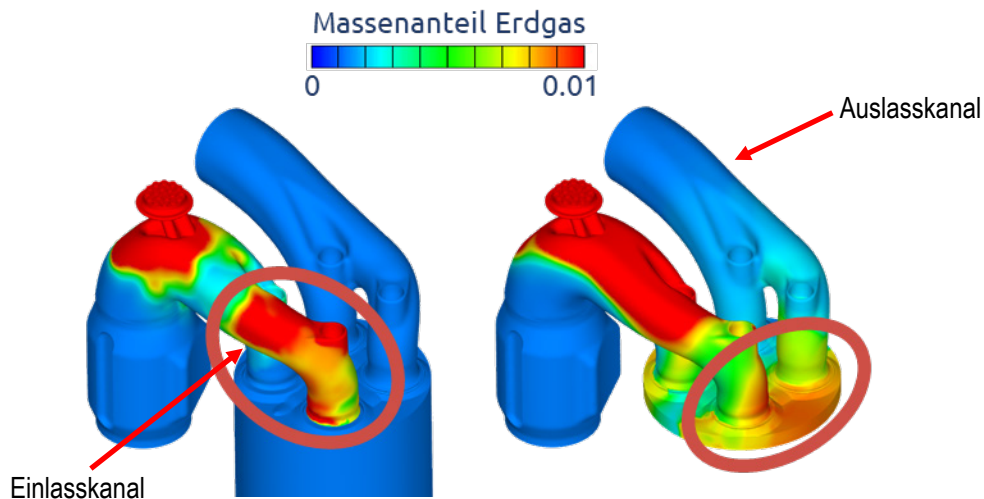


Abbildung 2: Quellen von Methanemission beim Dual-Fuel-Motor: links: Vorlagerung von Methan im Einlasskanal; rechts: Überspülen von Methan in den Abgaskanal während der Ventilüberschneidung

Die zweite Quelle hat ihren Ursprung direkt im Brennraum, der vollständig mit einem nahezu homogenen Erdgas-Luft-Gemisch gefüllt wird. Dadurch befindet sich das gebildete Gemisch auch direkt an den Brennraumwänden und in engen Spalten des Brennraums, z.B. zwischen Laufbuchse und Kolbenkrone und um die Ventilsitze. Während der Verbrennung kommt es zum Verlöschen der Flamme in diesen Bereichen, infolge der starken Wärmeabfuhr durch die brennraumbegrenzenden Bauteile (Zylinderkopf, Laufbuchse, Kolbenkrone). Die so verbleibenden, nicht verbrannten Kraftstoffanteile gelangen beim Gaswechsel mit dem Abgas in die Atmosphäre. Dieser sogenannte Methanschluß hat erhebliche negative Auswirkungen auf die THG-Bilanz von DF-Motoren. Im Ergebnis können aktuelle DF-Motoren ihren aus dem günstigen H/C-Verhältnis von Methan resultierenden theoretischen Vorteil in der THG-Bilanz von 20% praktisch nicht umsetzen. Da das aufgrund des Methanschlusses in die Atmosphäre emittierte unverbrannte Methan mit einem THG-Faktor zwischen 28 (100 Jahre) und 87 (20 Jahre) zu berücksichtigen ist, geht der Vorteil in der CO₂-Bilanz nahezu vollständig verloren.

Als Fazit aus dieser Überlegung gibt es ein theoretisches Minimum dieser Emissionen, welches durch innermotorische Maßnahmen nicht weiter abgesenkt werden kann. Bei in Serie befindlichen Dual-Fuel-Motoren geht man im Marinebereich von mittleren Methanemissionen in Höhe von 6,9 g/kWh aus¹. Aus LKV-internen Messungen sind Werte um 3 bis 4 g/kWh bei optimaler Ausnutzung des aktuellen Technologiestandes bekannt. Ein verbleibender Lösungsansatz ist die außermotorische Abgasnachbehandlung durch Oxidationskatalysatoren. Aufgrund der eingesetzten Magerbrennverfahren mit deutlichem Luftüberschuss (um $\lambda = 2$) und der hervorragenden Wirkungsgrade der Motoren sind die resultierenden Abgastemperaturen jedoch im Vergleich zu kleineren Motorkategorien wesentlich geringer und liegen je nach Betriebspunkt etwa im Bereich von 420 bis 500°C. Heute kommerziell verfügbare Katalysatorstechnologien haben in diesem Temperaturbereich jedoch keine ausreichend hohen Umsatzraten, sodass noch kein wirtschaftlicher Serieneinsatz darstellbar ist.

¹ Sergey Ushakov, Dag Stenersen, Per Magne Einang: „Methane slip from gas fuelled ships: a comprehensive summary based on measurement data“; Journal of Marine Science and Technology, <https://doi.org/10.1007/s00773-018-00622-z>

Gleichzeitig werden aber Motoren mit dem beschriebenen ND-Brennverfahren noch mindestens bis zum Jahr 2030 zum weitverbreiteten Standard gehören. Da weiterhin von hohen Zuwachsraten für LNG-betriebene Marineanwendungen in diesem Zeitraum ausgegangen wird, ist die Erforschung und Entwicklung von Maßnahmenpaketen zur Absenkung der innermotorischen Emissionen und darüber hinaus der nachgeschalteten Abgasnachbehandlungstechnologien von immenser Bedeutung. Abbildung 4 stellt die Zuwachsraten für LNG-betriebene Schiffe seit dem Jahr 2000 dar.

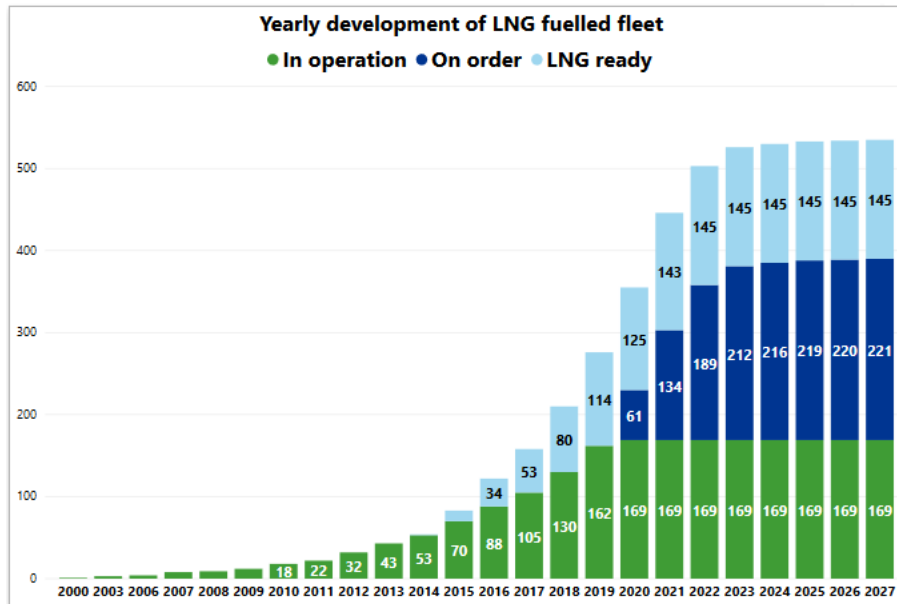


Abbildung 3: Entwicklungszahlen der LNG-betriebenen Schiffsflotte ²

Dabei sind die meisten Neubauten mit Dual-Fuel-Antrieb aus den Segmenten mit Fahrgästen (Passagierfähren, Kreuzfahrtschiffe) zu verzeichnen. Ursächlich ist hierfür das Bestreben der Schiffsbetreiber ein positiveres und grüneres Image für ihre Flotten aufzubauen und ältere mit Schweröl betriebene Einheiten durch umwelt-schonendere Anlagen zu ersetzen. Durch einzelne Studien und Medienberichte [4, 5] wird allerdings bereits der Fokus öffentlicher Diskussionen auf die beschriebenen Methanemissionen gelenkt. Die Großmotorenbranche kann ihren Teil durch die technische Weiterentwicklung der Verfahren dazu beitragen, dass die im Kern sehr umweltverträgliche Dual-Fuel-Technologie – minimale PM- und SOx-Emissionen, deutlich gesenkte NOx-Emissionen, CO₂-Vorteil von bis zu 20% – ihre gesellschaftliche Akzeptanz behält bzw. sogar steigert.

² Alternative Fuels Insight (AFI) data service; DNVGL (www.dnv.com); Abruf 18.06.2020

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung / Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt im Rahmen einer Auflistung der jeweiligen Arbeitspakete, in welche der LKV integriert war.

2.1.1 AP 1: Vorbereitung Anpassung Versuchsträger, Prüfstand und Medienversorgung

Im Laufe des Projektes wurden eine Reihe von technischen Neuerungen am Prüfstand umgesetzt und die Infrastruktur um diverse Teilsysteme erweitert. Durch die Realisierung dieser Systeme konnten angestrebte Projektziele unmittelbar umgesetzt und die Brennverfahren noch detaillierter analysiert werden. Dazu gehören unter anderem folgende Systeme:

- Gekühlte Hochdruck – AGR-Strecke mit bis zu 30 % AGR-Rate bei Vollast
- Erweiterung der Gasmischanlage für Wasserstoffzumischraten von bis zu 30 vol.-% bei Vollast; bis > 70 vol.-% bei Teillast
- Abgasbypassstrecke zur Untersuchung von bis zu zwei Standardkatalysatoren (15 x 15 x 15 BxHxT) mit Analyse der Abgaszusammensetzung vor und nach dem Katalysator
- Ausbau der Hochdruck-Brenngasinfrastruktur um einen Hochdruck Brenngasverdichter (bis 500 bar) sowie Druckregelstrecke für MD/HD Verfahren (ca. 10 – 500 bar) sowie Gasinjektoren in zwei Ausführungen für das Mitteldruck- (10 – 80 bar) sowie Hochdruckverfahren (100 - 500 bar)
- Anpassung des Forschungsmotors für Brennverfahrensuntersuchungen mit Gasdirekteinblasung-Motorbetrieb mit äußerer oder innerer Gemischbildung und auf derselben Power Unit mit identischem Zylinderkopf sowie Pilotinjektorkonzept für eine direkte Vergleichbarkeit
- Aufbau / Erweiterung der Komponentenprüfstände für DI – Injektoren: Anpassung des Hochdruck-Hochtemperatur Einspritzkammer für optische Untersuchungen der Gemischbildung sowie Aufbau eines Einblaseratenverlaufsindikators für Untersuchungen und sicherheitsgerichtete Funktionstests der DI-Gasinjektoren.

Eine detaillierte Beschreibung der genannten Technologien erfolgt in den Kapiteln der jeweiligen zugehörigen Arbeitspakete. Zusätzlich wurden weitere Anpassungen/Weiterentwicklungen unabhängig von einzelnen Arbeitspaketen oder Technologiekonzepten vorgenommen:

Update der Mess- und Regelungstechnik

Die Mess- und Regelungstechnik wurde innerhalb des Prüfstandes um die folgenden Systeme erweitert bzw. ertüchtigt, um die Qualität der Messwerte nochmals zu verbessern.

- ein Blow-By-Meter plus Auswerteeinheit

Das in den Prüfstand integrierte Blowby-Meter wurde parametrisiert und dauerhaft in den Prüfstandsbetrieb integriert. Damit ist eine permanente Prüfung des Verschleißzustandes im Messbetrieb möglich.

- eine Hard- und Software-Aktualisierung der Rechentechnik im Leitstand (SPS, Messwerterfassung und Motorsteuergerät)

- XION Indizierplattform

Im aktuellen Projektzeitraum wurde eine XION Indizierplattform beschafft. Das XION wurde per CAN-Kommunikation mit dem Motorsteuergerät verknüpft, sodass Kennwerte direkt aus der Druckverlaufsanalyse als Basis für die Motorregelung dienen und Kennwerte wie der Mitteldruck und der Verbrennungsschwerpunkt permanent an die Messwerterfassung übertragen werden können. Das XION erlaubt auch die Integration von individuellen Berechnungsalgorithmen, wie die Detektion von Verbrennungsanomalien. Dies ist besonders im Hinblick auf höhere Wasserstoffzumischungsraten von Relevanz. Des Weiteren konnte der im Rahmen der abgeschlossenen Promotion von Herrn Karsten Schleef entwickelte Regelungsansatz für den Betrieb mit unterschiedlichen Brenngaszusammensetzungen in die Online-Druckverlaufsanalyse integriert werden, sodass die Funktionalität experimentell nachgewiesen und zum Patent angemeldet werden konnte [DE102022121793A1 „Piloteinspritzbasiertes Regelungskonzept zur Verwendung unterschiedlichster Brenngasqualitäten an Dual-Fuel-Motoren“]. Damit konnte die Zuverlässigkeit und Qualität der Messdaten erhöht werden.

- Bildverstärker für optische Untersuchungen der Gasdirekteinblasung

Im Rahmen des Projekts wurde ein optischer Bildverstärker beschafft, um das aus den chemischen Reaktionen bei der Verbrennung kohlenstofffreier Kraftstoffe wie Wasserstoff sichtbar machen zu können. Damit konnte die optische HD-HT-Einspritzkammer im Rahmen der Arbeitspakete bezüglich der Komponentenuntersuchungen zur Charakterisierung der neuartigen Gas-DI-Injektoren umfassend erweitert werden.

- Temperaturmesslaufbuchse

Um die Auswirkung der Wasserstoffzumischung auf die Brennraumtemperaturen zu quantifizieren, wurde eine Laufbuchse der Firma M. Jürgensen mit Thermoelementen bestückt (Abbildung 4). Dadurch wurde die Temperaturmessung in der Laufbuchsenwand an 10 Stellen möglich. Es können hierdurch Einblicke in die Thermodynamik des Wärmeübergangs in der Wand gewonnen werden. Es gab darüber hinaus Aufschluss über die Unterschiede zwischen „normalem“ Betrieb mit Erdgas und Betrieb mit Wasserstoffzumischung. Diese Messungen unterstützten auch die Simulationsarbeiten, indem Randbedingungen für die 3D – CFD erzeugt wurden, die die Güte der Simulationsergebnisse positiv beeinflussen. Außerdem konnten über die Zeit Daten zur thermischen Belastung der Laufbuchse gesammelt werden. Eine statistische Aufarbeitung kann die Entwicklung der Bauteile für Wasserstoffzumischung voranbringen.



Abbildung 4: Laufbuchse bestückt mit Thermoelementen

Hierzu erfolgte eine weitere Optimierung durch eine automatisierte Datenauswertung mit deutlich weniger Zwischenschritten mit Hilfe von MATLAB. Die optimierte und automatisierte Datenverarbeitung ermöglicht es, die Daten schneller und maßgeschneidert auszuwerten. Die Einzelschritte sehen hier wie folgt aus:

- Aufnahme der globalen Prüfstandsmessdaten in einer Auflösung von 1 Hz in das csv.-Datei-Format

- Aufnahme der hochaufgelösten Indiziermessdaten + integrierter DVA-Auswertung innerhalb der Auswerteeinheit in einer Auflösung von 0,1 °KW im i-File-Format
- Deutlich vereinfachte Konvertierung der csv.- und i-Files in MAT-Files mit zusätzlicher Auswerteroutine zur Erstellung eines Versuchsreihenpunktes in einem einzigen MATLAB-Script
- Erstellung einer Graphical-User-Interface mit dem MATLAB-App-Designer zur Visualisierung der Messdaten
- MATLAB-Auswerteroutine zur Auswertung und Visualisierung von zusammenhängenden Versuchsreihen
- MATLAB-Add-On zur Klopf- und Zündaussetzeralgorithmen
- Speicherung und Auswertung von Log-Dateien über einen gesamten Versuchstag, sodass der Belastungszustand verschiedener Bauteile über längere Zeiträume hinweg präzise dokumentiert werden kann

Des Weiteren wurde von der FVTR GmbH ein Sharepoint zum Messdatentransfer zwischen den einzelnen Projektpartnern erstellt. Die MATLAB-Routine des LKV beinhaltet hier zusätzlich die Erstellung von Dateien im gewünschten Format mit den gewünschten Messkanälen durch automatisches Speichern in den jeweiligen Projektordern der einzelnen Projektpartner. Hiermit ist ein zügiger und komplikationsloser Messdatenaustausch möglich.

2.1.2 AP 2: Grundlagenentwicklung Simulation der DI-Gasbrennverfahren

Hier werden die durchgeführten Arbeiten im Bereich der Simulation vorgestellt.

Entwicklung eines Gasjet-Targeting-Tools zur Vorhersage der Gasjet-Kolben Interaktion für MD- und HD-Gasbrennverfahren

Ein Gasjet-targeting-Tool wurde entwickelt, um eine schnelle Vorhersage des Gasjet-Kolben Interaktion zu kalkulieren. Das Struktogramm des Tools ist in Abbildung 5 zu sehen.

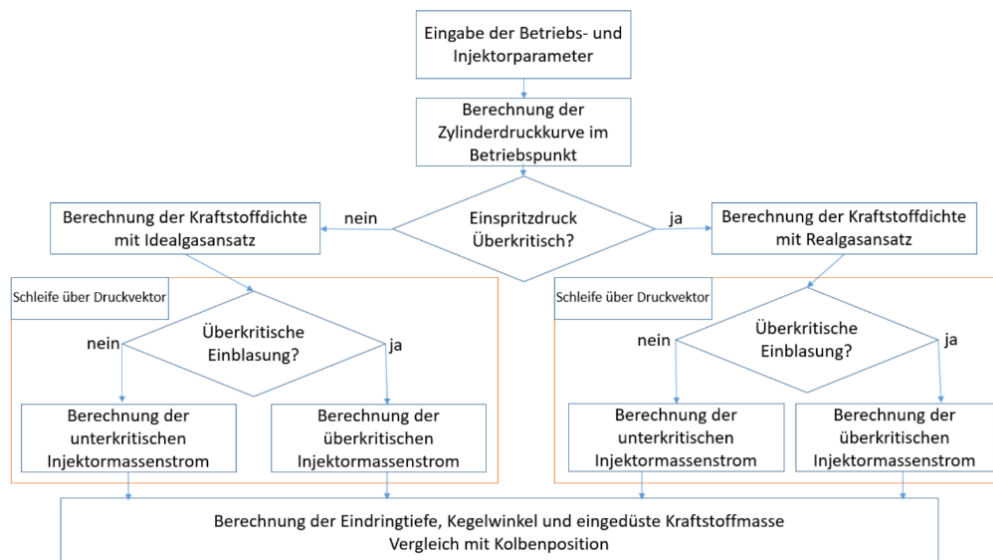
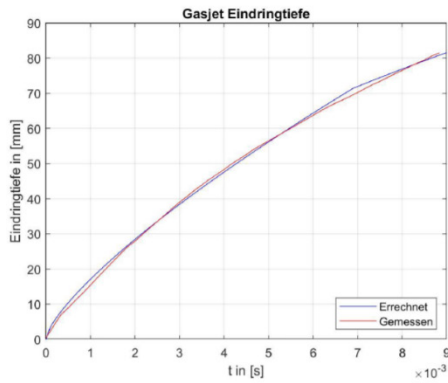
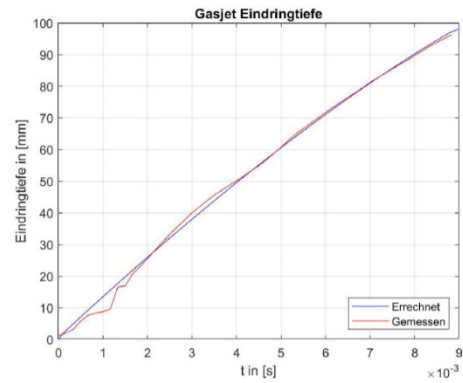


Abbildung 5: Struktogramm des Gasjet-Targeting-Tools

Dieses Programm berechnet Eindringtiefe, Kegelwinkel und eingedüsten Kraftstoffmasse bei gegebenen Injektor- und Motorparametern und bei überkritischen und unterkritischen Einblasung. Das Modell konnte validiert werden und gibt gute Ergebnisse für eine strahlförmige Eindüsung, siehe Abbildung 6.



Unterkritisch, NPR = 2
 Kegelwinkel Gemessen: 35.702°
 Kegelwinkel Errechnet: 35.703°



Kritisch, NPR = 3
 Kegelwinkel Gemessen: 37.774°
 Kegelwinkel Errechnet: 37.773°

Abbildung 6: Vergleich der Resultate der Gasjet-Targeting Tool des LKV mit der gemessenen Eindringtiefe eines Gasinjektors

Für einen Hohlkegeleindüsung gibt diese Modellierung jedoch keine guten Resultate der Eindringtiefe, sodass hierfür die 3D-CFD Simulation unabdingbar wurde.

Dieses Tool wurde im Laufe des Projektes benutzt um Kraftstoffmassenströme in Abhängigkeit des Eindüsezeitpunkts für die Simulationen der Gasdirektinblasung zu berechnen.

Vollmotormodell

Durch das Ausscheiden der Caterpillar Motoren GmbH wurde die Entwicklung des Vollmotormodells durch den LKV übernommen. Das unter LEDF2 entwickelte bestehende Einzylindermodell des LKV wurde in AVL Cruise M zu einem Vollmotormodell mit 6 Zylindern weiterentwickelt. In Zusammenarbeit mit der Kooperationspartner KBB wurde ein passender Turbolader gewählt und innerhalb der Simulationsumgebung modelliert, siehe Abbildung 7.

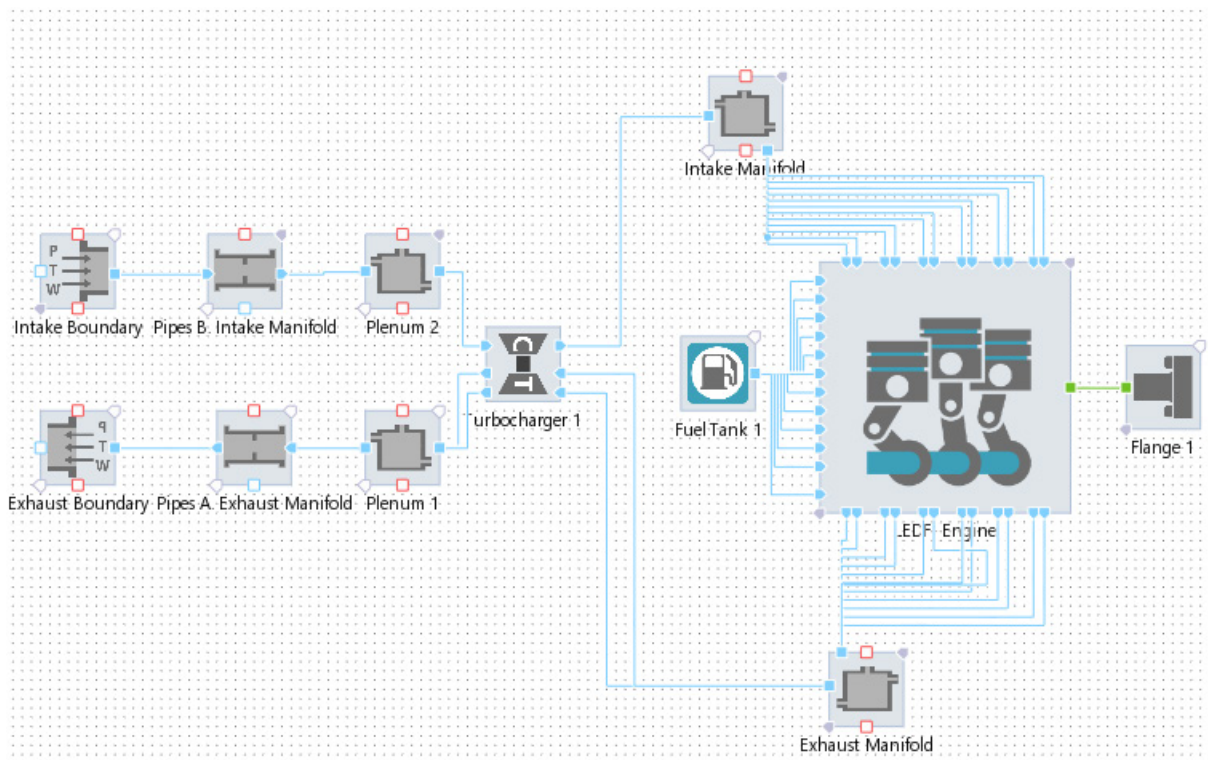


Abbildung 7: Vollmotormodell, 6 Zylinder MAK 34DF

Das Turboladermodell konnte validiert werden, sodass gute Resultate bezüglich des Einflusses von anderen Kraftstoffzusammensetzungen erzielt werden konnten.

0D – 1D Simulation der MD Gasstrecke

Die 0D/1D Simulation konnte auch genutzt werden, um die Auslegung einer Drossel für die MD-Gasstrecke zu erleichtern. Die MD-Gasstrecke wurde hierfür modelliert und eine Drossel mithilfe der Simulation ausgelegt. Auch bei der Auslegung der Verrohrung am Injektor konnte die 0D/1D Simulation genutzt werden, um die optimale Leitungsdurchmesser zu bestimmen.

Prüfstandsdatenmanagementsystem

Das bestehende Prüfstandsdatenmanagement-Tool, welches die Prüfstandsdaten einliest, konvertiert und speichert, wurde an die neue Hardware und Datenkanalstruktur angepasst und damit weiterentwickelt. Es wurde im Laufe des Projekts grundlegend erneuert und auf die Bedürfnisse des Projekts abgestimmt, sodass die automatische Erzeugung konsistenter Datensätze und Einbindung aller Randbedingungen und Betriebsdaten gegeben ist. Das ist ein großer Schritt im internen Forschungsdatenmanagement, da sämtliche Motorversuchsdaten nun einheitlich archiviert und zukünftig aufrufbar sind.

AP2.2 Entwicklung eines Methanschlußmodells für Dual-Fuel Gasmotoren

Ein Methanschlußmodell wurde durch die FVTR GmbH entwickelt. Hier hat der LKV mitgewirkt durch die umfangreiche Bereitstellung von Prüfstandsdaten und Messdaten zur Bestimmung der Modellgrößen und Randbedingungen für das Simulationsmodell, zur Abstimmung der Modellgrößen und zur Validierung der generierten Simulationsergebnisse.

Außerdem wurde die Auswertung von Daten durch die Entwicklung von Auswertetools unterstützt und Teammeetings zum gegenseitigen Fortschrittsabgleich und Unterstützung bei der Erstellung des Modells in AVL Cruise M durchgeführt. Weitere Infos zum Methanschlußmodell sind dem Abschlussbericht der FVTR GmbH zu entnehmen..

AP2.3 3D-CFD Motorprozesssimulation

Im Arbeitspaket 2.3 wurden umfassende 3D-CFD Simulationen des Motorinnenprozesses durchgeführt. Hierfür musste zunächst die notwendige Simulationsplattform erschaffen werden.

Neuanschaffung und Inbetriebnahme Hochleistungsrechner

Als Grundvoraussetzung für die erfolgreiche 3D-CFD Simulation wurden zwei neue Hochleistungsrechner konfiguriert, installiert und in Betrieb genommen. So stehen 256 AMD-Rechenkerne mit 1TB Arbeitsspeicher für die Simulation zur Verfügung. Da das System als Stand-Alone System konzipiert wurde, standen diese Rechenkapazitäten dem „TEME 2030+“- Projekt exklusiv zur Verfügung, womit es zu keinen Verzögerungen durch Warteschlangen an dem Universitäts-Cluster kam. Die neuen Rechner wurden in einem separat gesicherten Serverraum des LKV untergebracht.



Abbildung 8: Hochleistungsrechencluster im Serverraum des LKV

Auslegung HD-HT Kammer

Die Gasinjektoren wurden vor dem Einbau im Motor in der Hochdruck-Hochtemperatur Einspritzkammer optisch vermessen. Dieses Verfahren bietet unter anderem die Möglichkeit, die Genauigkeit der CFD-Simulation zu überprüfen. Hierfür wurden 3D-CFD Modelle der HD-HT Einspritzkammer mit den verschiedenen Injektoren vorbereitet.

Mithilfe der Simulation wurden die besten Positionen für die Platzierung der Injektoren für die optische Spraymessungen bestimmt: einen radialen Einbau für den Injektor mit Strahlführung, einen Axialen für den Injektor ohne Strahlführung, wie im Abbildung 9 zu sehen ist.

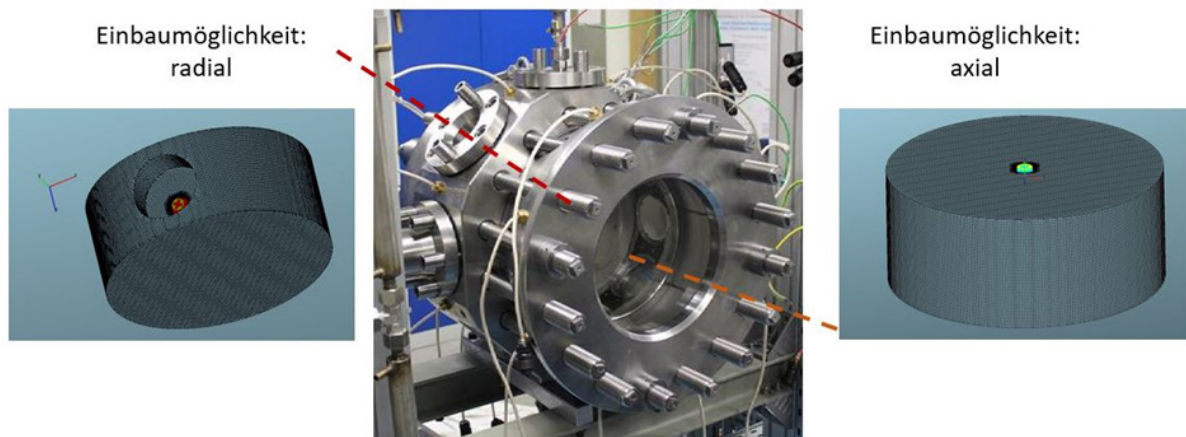
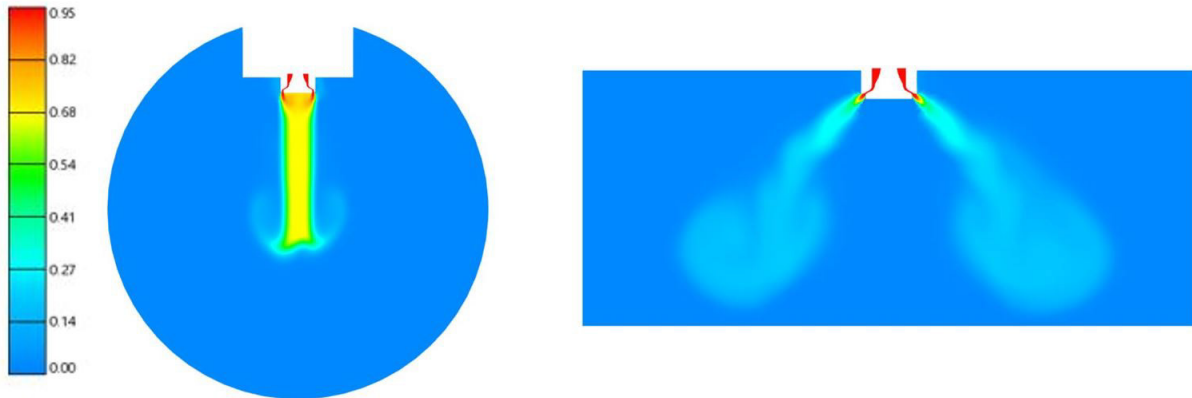


Abbildung 9: Einbaupositionen und Rechengitter für die Simulation der Injektoren im HD-HT Kammer

Somit konnten auch die experimentellen Spraybilder mit den simulierten Gasjets verglichen und die Genauigkeit der Simulation durch Anpassung der Randbedingungen erhöht werden. Durch diesen Validierungsschritt konnte eine hohe Sicherheit der simulierten Ergebnisse erzielt werden.

Massenbruch CH4



Injektor mit Strahlführung in der HD – HT Einspritzkammer, radialer Einbau

Injektor ohne Strahlführung in der HD – HT Einspritzkammer, axialer Einbau

Abbildung 10: Simulation der Methaneindüsung in der Hochdruck-Hochtemperatur Einspritzkammer

Entwicklung 3D-CFD Modelle für MD- und HD-Gasdirekteinblaseverfahren

Um den besten Kompromiss aus Rechenzeit und Genauigkeit zu finden, wurde zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Mit kleinerer Zellengröße besitzt ein CFD-Modell eine höhere Anzahl an Zellen, wodurch die Genauigkeit aber auch die Rechenzeit erhöht wird. Bei einer ausreichend kleinen Zelle wird bei einer Verkleinerung der Zelle keine Verbesserung der Genauigkeit erreicht.

In dieser Sensitivitätsanalyse wurden jeweils vier Rechengitter (Injektor mit Strahlführung / ohne Strahlführung) miteinander verglichen, wie in

Tabelle 1 dargestellt wird.

Tabelle 1: Übersicht der entwickelten Rechengitter für die Sensitivitätsanalyse

Variante	Gitterart	Zellgröße in mm	Anzahl Zellen im Netz
Injektor mit Strahlführung	Sehr grob	8	500.000
Injektor mit Strahlführung	Grob	6	900.000
Injektor mit Strahlführung	Mittel	4	2.000.000
Injektor mit Strahlführung	Fein	3	3.800.000
Injektor ohne Strahlführung	Sehr grob	8	500.000
Injektor ohne Strahlführung	Grob	6	900.000
Injektor ohne Strahlführung	Mittel	4	2.000.000
Injektor ohne Strahlführung	Fein	3	3.800.000

Der gleiche Simulationsfall wurde an allen 8 Rechnernetzen gerechnet. Die Eindringtiefe des Gasstrahls wurde demnach verglichen, um die Auswirkung der Verringerung der Zellengröße zu beurteilen. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Abbildung 11 zu sehen.

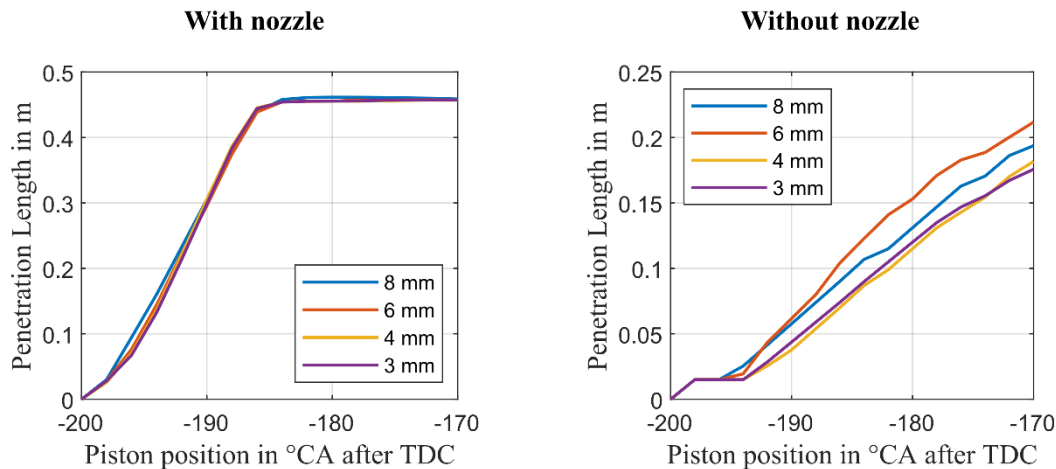


Abbildung 11: Vergleich der Eindringtiefe bei verschiedenen Zellengrößen

In diesem Vergleich wurde die optimale Zellengröße von 4 mm (mittel) festgestellt, da keine nennenswerte Verbesserung der Genauigkeit bei weiterer Verkleinerung der Zellgröße eintritt. Bei dem Injektor ohne Strahlführung (rechts) wird die Verbesserung der Ergebnisse durch die Reduzierung der Zellengröße von 6 mm auf 4 mm sehr deutlich. Bei dem engen Strahl des Injektors ohne Strahlführung (linker Plot) fällt die Abweichung nicht so stark aus, da bei dem gebündelten Strahl hohe Gasgeschwindigkeiten in Z-Richtung und dementsprechend weniger Diffusion in den anliegenden Zellen in X- und Y-Richtung vorkommen. So sind die Ergebnisse bei den verschiedenen Zellengrößen dichter beieinander, da sich der Hauptstrahl mit hoher Geschwindigkeit in Z-Richtung bewegt. Jedoch tendiert die Simulation mit einer Zellengröße von 6 und 8 mm zu Beginn der Eindüsung zum Überschießen, im späteren Verlauf fällt die Eindringtiefe niedriger aus. Zwischen den mittleren und feinen Zellengrößen gibt es kaum Unterschiede. Eine Verbesserung der Genauigkeit gibt es jedoch auch in diesem Fall bei dem Wechsel von einer Zellengröße von 6 mm auf 4 mm. Diese mittlere Zellengröße bietet eine schnellere Rechenzeit als das feinere Rechengitter, da weniger Zellen existieren, für die CFD Gleichungen gelöst werden müssen. Aus diesem Grund wurden alle Rechengitter mit der nominellen Zellengröße 4 mm generiert. Die Rechengitter werden um Injektoren und entlang der Wand verfeinert, um die Strömungsverhältnisse hier besser abzubilden. Für die verschiedene Anwendungsfälle (ND/MD/HD) wurden Rechengitter erstellt. Eine vereinfachte Übersicht der benutzten Modelle gibt Tabelle 2

Tabelle 2: Benutzte Rechengitter für die 3D-CFD Simulation

Kolbenmulde	Injektor	Last	Eindüsezeitpunkt
ND-Verfahren			
Standard Mulde	SOGAV	50 % / 100 %	361KWvOT ... 359°KWvOT
MD-Verfahren			
Standard Mulde	Mit / ohne Strahlführung	50 % / 100 %	337°KWvOT ... 45°KWvOT
High Squish Mulde 1	Mit / ohne Strahlführung	50 % / 100 %	337°KWvOT ... 45°KWvOT
High Squish Mulde 2	Mit / ohne Strahlführung	50 % / 100 %	337°KWvOT ... 45°KWvOT
TEME Mulde	Mit / ohne Strahlführung	50 % / 100 %	337°KWvOT ... 45°KWvOT
HD-Verfahren			
Standard Mulde	Mit / ohne Strahlführung	50 % / 100 %	70°KWvOT ... 10°KWvOT
TEME Mulde	Mit / ohne Strahlführung	50 % / 100 %	70°KWvOT ... 10°KWvOT

Für jede Kombination aus Mulde, Injektor und Injektorkonfiguration, Lastpunkt und Eindüsezeitpunkt wurden einen neuen Rechengitter zur Simulation der jeweiligen Betriebspunkt generiert.

Motorsimulation- Anwendung der 3D – CFD Modelle zur Unterstützung der experimentellen Arbeiten und Detailanalyse der Brennverfahren

Das Programm „AVL Fire M“ wurde für die Motorsimulation benutzt. So konnte ein grundlegendes Verständnis der verschiedenen Brennverfahren gewonnen werden.

Simulation und Analyse der Gemischbildung des ND – Verfahrens

Zum besseren Verständnis und als Vergleich zu den neuartigen Brennverfahren wurde das ND-Verfahren bei 50 % und 100 % Last simuliert. Die Kraftstoffdosierung erfolgt über einen SOGAV Ventil welches zum Ende der Ventilüberschneidung geöffnet wird.

Abbildung 12 zeigt die Einbringung des Kraftstoffs während des Einlasstaktes.

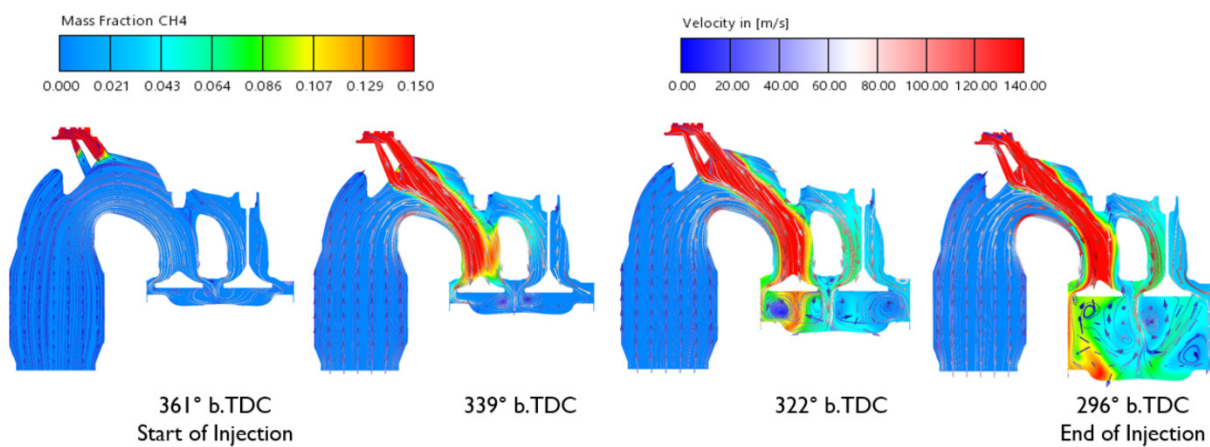


Abbildung 12: Kraftstoffdosierung bei ND Verfahren, 100 % Last

Über den „mass fraction CH₄“ (Methan Massenbruch) wird der Weg des Kraftstoffs in den Zylinder ersichtlich. In einem Strahl gebündelt, durchströmt er hauptsächlich das Linke der beiden Einlassventile. So entsteht ein fetteres Bereich unterhalb dieses Ventils im Zylinder.

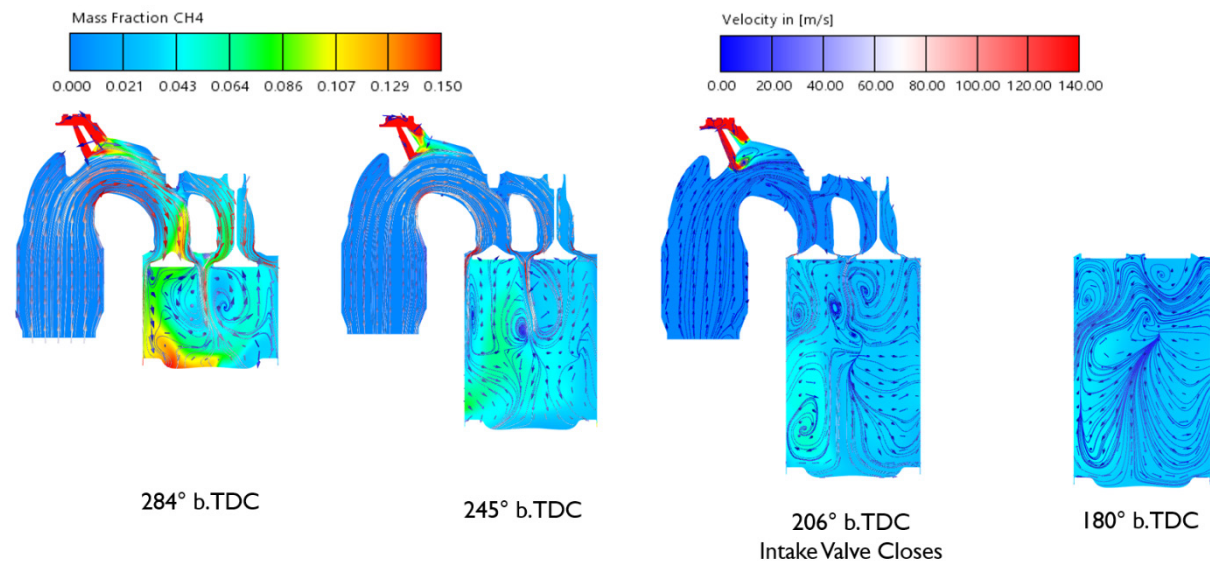


Abbildung 13: Homogenisierung des Kraftstoff-Luft Gemischs im Einlasstakt, ND-Verfahren, 100 % Last

Nach der Eindüsung befindet sich noch Methan im Einlasskanal (siehe Abbildung 13). Im Einlasstakt wird es durch die Strömung mitgerissen und gelangt so zum Zylinder. Ein Teil des Methans bleibt jedoch nach Einlassventil Schließt im Einlasstrakt. Bei 50 % Last beträgt die Menge 183,5 mg (10,3 % der eingedüsten Kraftstoffmasse), bei

100 % Last, 376,1 mg (10,6 % der eingeäuserten Kraftstoffmasse). Im nächsten Zyklus wird dieses Methan während der Ventilüberschneidung die Einlassventile passieren. Obwohl nicht alles davon direkt in den Auslass überspült wird, bringt diese Methanmenge die Risiken von zyklischen Schwankungen, klopfende Verbrennung und Überspülverluste mit sich.

Weitere Homogenisierung folgt im Kompressionstakt, wie im Abbildung 14 anhand des Luft-Kraftstoff Verhältnis Lambda zu sehen ist.

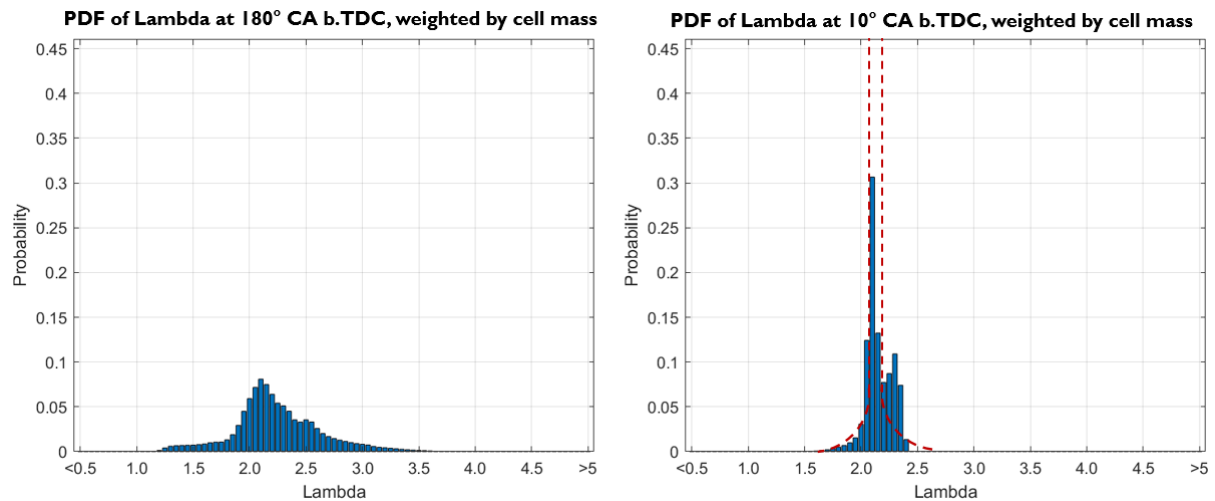


Abbildung 14: Homogenisierung im Kompressionstakt, ND-Verfahren bei 100 % Last

Um 180°KWvOT ist schon eine Homogenisierung zu erkennen, da die massengewichteten Lambdawerte sich in einem Gebiet von 1,2 bis 3,6. häufen. Eine ideale Homogenisierung ist in der rechten Grafikhälfte durch die rot gestrichelten Linien dargestellt. Die Lambda-Werten sind stark um den mittleren Lambda-Wert gehäuft. Um 10° KWvOT, kurz vor Brennbeginn, sieht die Zylinderladung gut durchmischt aus. Die Lambda-Spanne beträgt 1,6 bis 2,4, wobei die höchste Häufigkeit bei einem Lambdawert von 2,1 beträgt, nahe dem globalen Luft-Kraftstoff Verhältnis von 2,2.

Simulation und Analyse der Gemischbildung des Mitteldruck – Verfahrens

Bei dem Mitteldruck- und Hochdruck-Verfahren (MD / HD) wird das Brenngas direkt in den Brennraum eingebracht. Das Verhalten der Injektoren wurde vor dem Betrieb im Motor mithilfe der 3D-CFD analysiert.

Injektor ohne Strahlführung

Der Injektor ohne Strahlführung emittiert unter Umgebungsbedingungen einen breiten Hohlkegel an Methan. Je nachdem, zu welcher Zeitpunkt die Eindüsung gesetzt wird und wie die herrschenden Bedingungen im Brennraum sind, fällt die Ausbildung des Strahls jedoch verschieden aus. Abbildung 15 zeigt der Form der Einblasung bei einem Einblasebeginn im Einlasstakt.

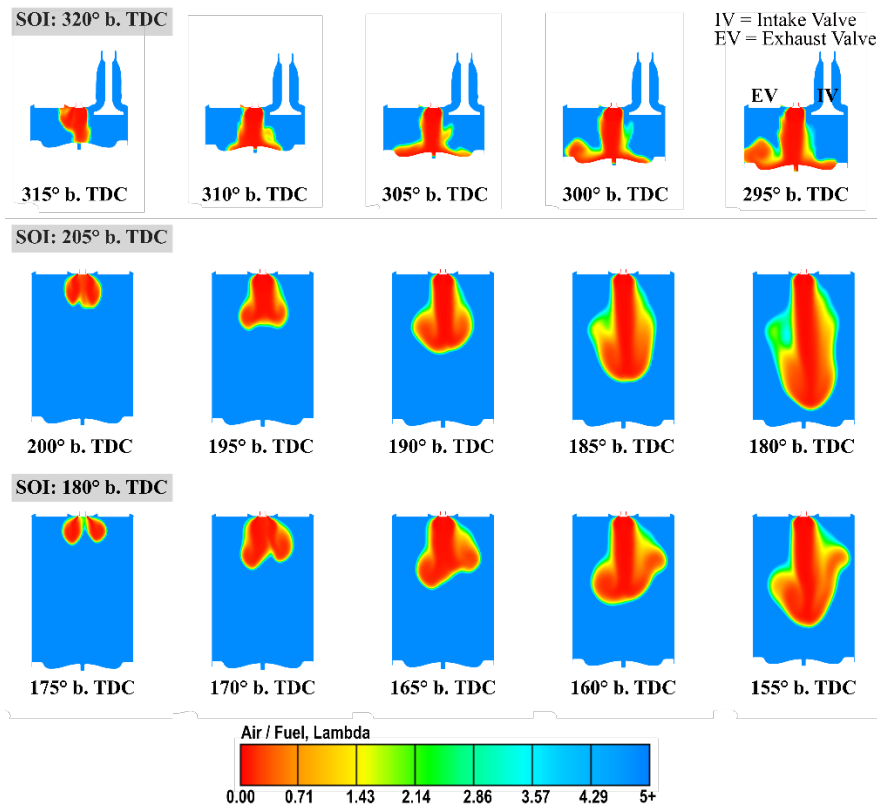


Abbildung 15: Form der Gaswolke bei unterschiedlichen Eindüsebeginn im Einlasstakt, 100 % Last

Die frühe, saugsynchrone Einblasung (320 °KWvOT) resultiert in einem relativ engen Strahl, da die Fließrichtung der Luft im Zylinder durch das offene Einlassventil bestimmt wird. Diese Strömung verhindert die vollständige Ausbildung des Hohlkegels und bündelt das Gas zu einem Strahl. Bei Eindüsen bei geschlossenem Einlassventil (Eindüsebeginn / SOI 205° KWvOT oder 180° KWvOT) wird der Kegel breiter und die Eindringtiefe geringer aufgrund der fehlenden Einlassströmung.

Bei Eindüsen im Kompressionstakt wird dieser Effekt gestärkt durch den höheren Gegendruck, wie in Abbildung 16 dargestellt.

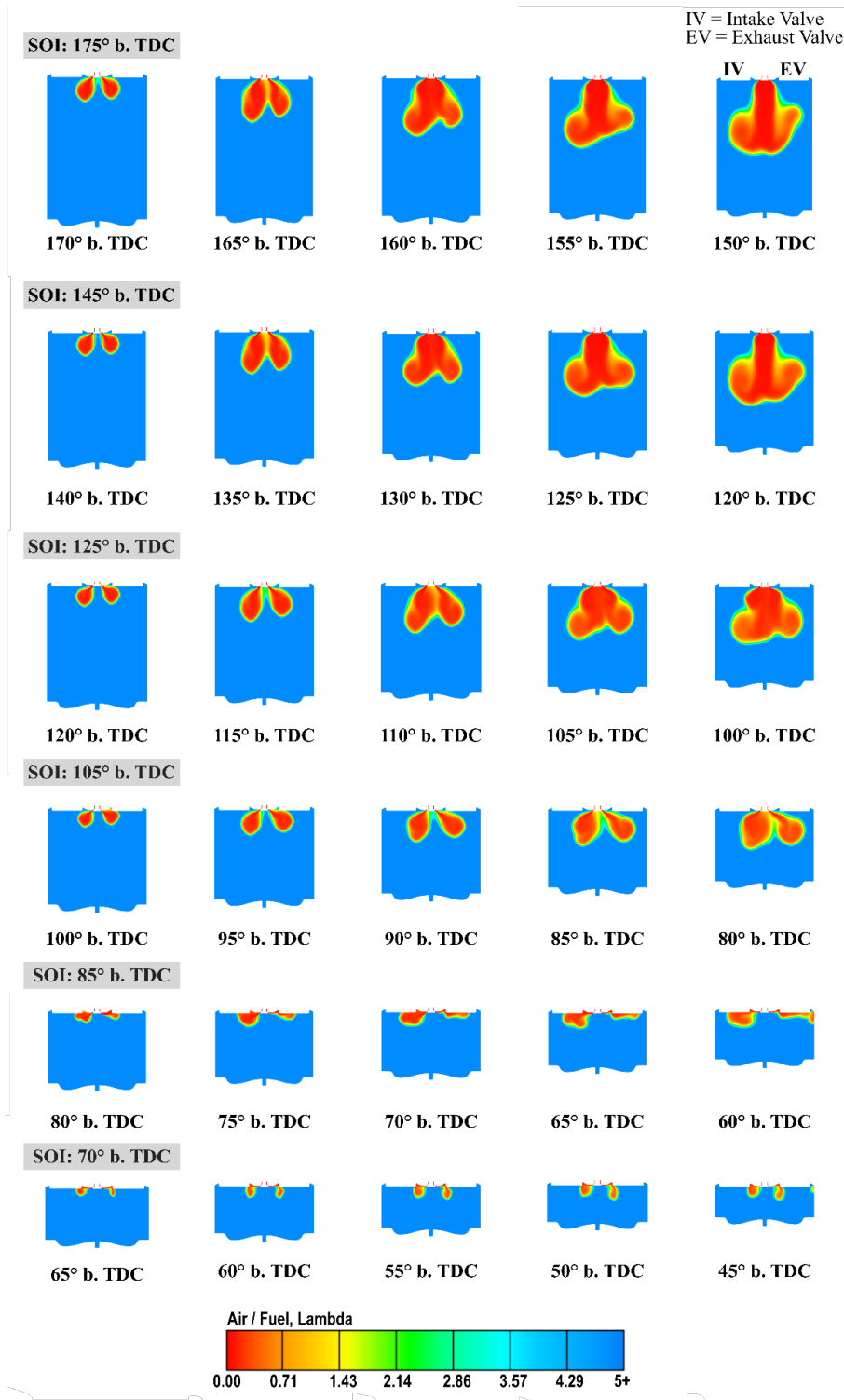


Abbildung 16: Eindüsen im Kompressionsstakt, MD - Verfahren, 100 % Last

Je später die Eindüsung im Kompressionsstakt stattfindet, desto breiter wird der Kegelwinkel und desto kürzer die Eindringtiefe. Dieses Verhalten ist ebenfalls im Abbildung 17 dokumentiert.

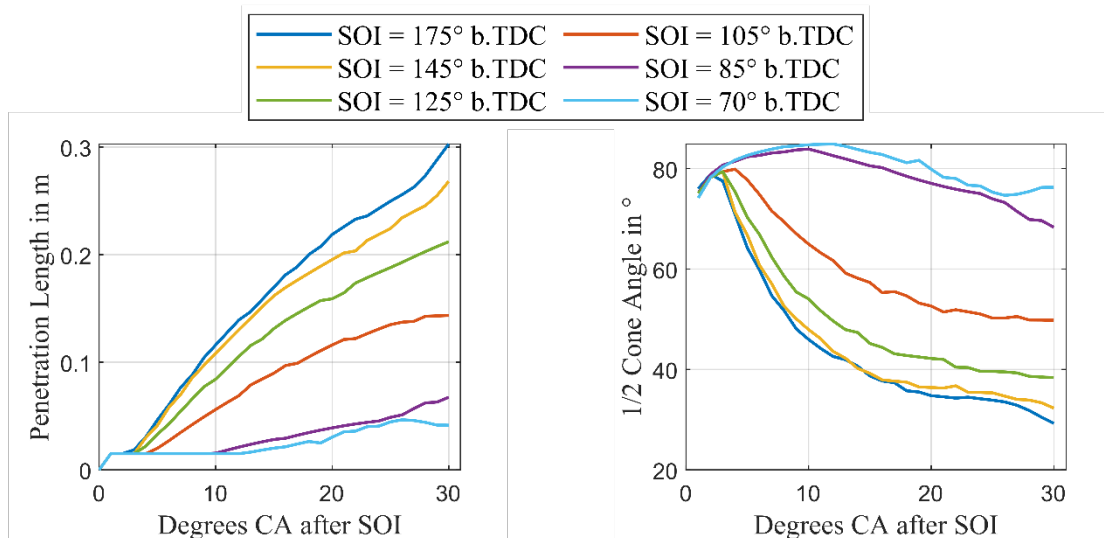


Abbildung 17: Eindringtiefe und Kegelwinkel bei verschiedenen Einblasezeitpunkten, MD-Verfahren, 100 % Last

Einblasungen später als 85° KWvOT besitzen kaum Eindringtiefe und einen Kegelwinkel zwischen 150 - 180°. Das hat den Coandă Effekt zur Ursache, da ein Unterdruckbereich zwischen Strahl und Zylinderkopf entsteht, aufgrund dessen, dass die Luft von dem Strahl mitgerissen wird, wie in Abbildung 18 präsentiert.

SOI: 70° b. TDC

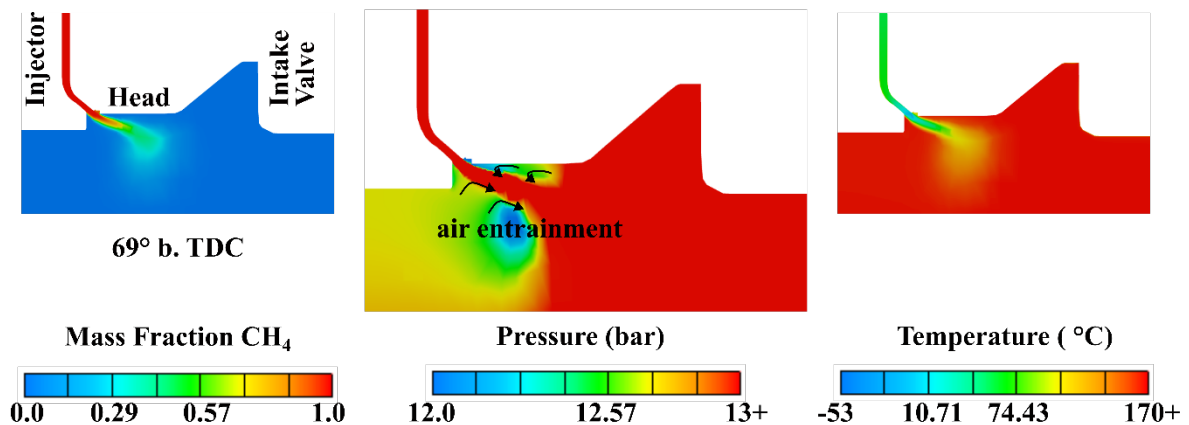


Abbildung 18: Coandă Effekt bei später Einblasung, ND Verfahren, 100 % Last

Die Niederdruck-Bereiche an jeder Seite des Strahls sind klar ersichtlich. Da beim Zylinderkopf nicht ausreichend Luft nachströmen kann, entsteht hier ein Unterdruck, welcher den Gasstrahl am Zylinderkopf anliegen lässt. Die fehlende Ausbreitung des Strahls bei später Einblasung wirkt sich ungünstig für die Gemischbildung aus, wie aus den Lambdaverteilungen in Abbildung 19 zu erkennen ist.

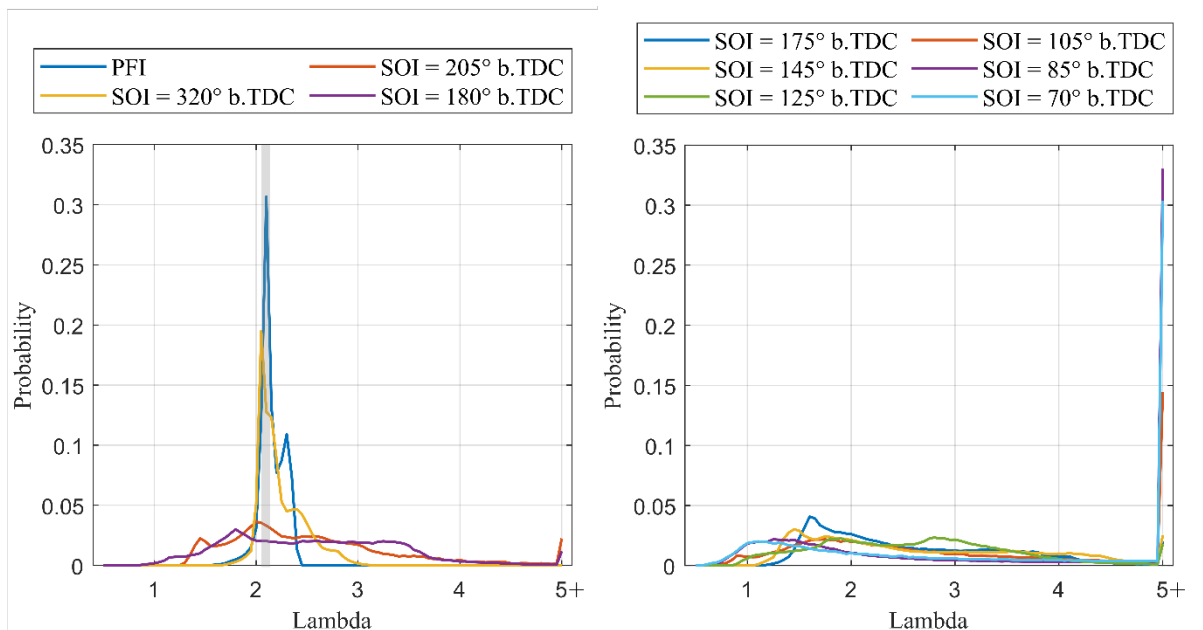


Abbildung 19: Lambda-Verteilungen verschiedener Eindüsen, MD-Verfahren, 100 % Last

Bei 100 % Last wird der höchste Grad der Homogenisierung im ND (PFI – Saugrohreinbläsung) Betrieb realisiert. Für ein homogenes Gemisch im Mitteldruckverfahren eignet sich die saugsynchrone Einblasung. Spätere Einblasungen resultieren in heterogenen Gemische mit fetten und mageren Bereichen, die das Risiko von Klopfen oder unverbranntem Methan mit sich bringen.

Bei 50 % Last wird eine bessere Homogenisierung mit saugsynchroner Direkteinblasung als mit dem herkömmlichen Saugrohrdosierung erreicht, siehe Abbildung 20.

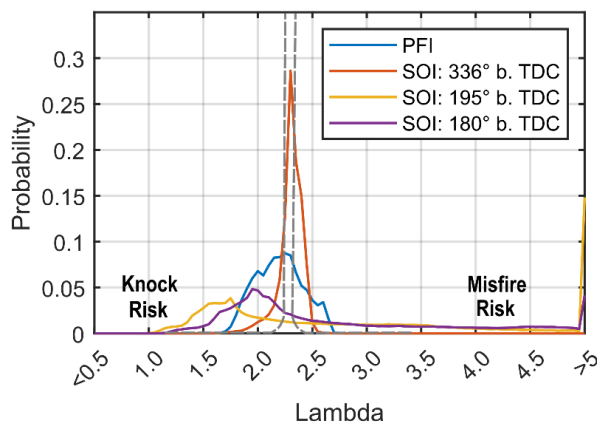


Abbildung 20: Lambda-Verteilungen verschiedener Eindüsen, MD-Verfahren, 50 % Last

Das hat die geänderten Ventilsteuerzeiten zur Ursache. Bei 50 % Last schließt das Auslassventil früher, sodass die saugsynchrone Eindüsung ebenfalls früher gesetzt werden kann. Es ist dadurch mehr Zeit für die Homogenisierung vorhanden. Hier ist auch deutlich zu sehen, dass spätere Einblasungen auch zu fetteren Bereichen im Zylinder führen, was das Risiko von Klopfen erhöht.

Vorentwicklung des homogenen MD-Brennverfahrens

Aufgrund der durchgeführten Simulationen konnte das Injektorverhalten schon vor physischer Bereitstellung der Injektoren untersucht werden. Der saugsynchrone Einblasung wurde als bestmögliche Option für ein homogenes Brennverfahren identifiziert. Auf Basis dieser Erkenntnisse aus den Simulationsuntersuchungen konnte der Versuchsumfang deutlich reduziert werden. Die im Projektlaufzeit später aufgezeichneten experimentellen Resultate zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen.

Injektor mit Strahlführung

Der Injektor mit Strahlführung unterliegt nicht der gleichen Problematik wie die Variante ohne Strahlführung. Das Gas wird gebündelt in dem Brennraum eingebracht und erreicht dadurch eine gute Eindringtiefe. Dies ermöglicht sehr späte Einblasungen im Kompressionstrakt und ergibt dadurch die Möglichkeit einer Schichtladung.

Entwicklung einer Kolbenmuldengeometrie für Schichtladung

Durch die Schichtladung kann das Methan aktiv von der kalten Brennraumwand entfernt gehalten werden, sodass weniger Verluste durch unverbranntes Methan entstehen (und demzufolge auch weniger Methanschluß). Hierfür müssen Kolbenform, Injektor und Einblasetiming optimal aufeinander abgestimmt werden.

Hierfür wurde ebenfalls die 3D-CFD Simulation benutzt. Mithilfe der Simulation konnten strömungsoptimierte Kolbenkronen in der Simulationsumgebung getestet werden. Das erfolgreichste Design wurde durch KS-Large Bore Pistons GmbH gefertigt und am Versuchsmotor getestet, siehe Abbildung 21.

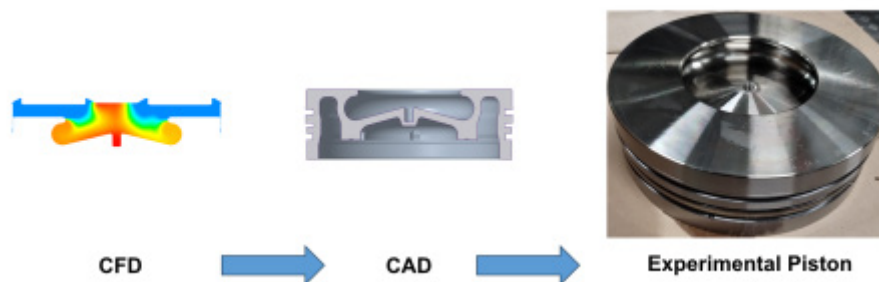


Abbildung 21: Entwicklungsprozess Schichtladungskolbenoberteil für MD-Verfahren

Durch die Kombination aus einer späten strahlförmigen Einblasung und eine dafür geeignete Kolbenmuldengeometrie, kann das Methan in der Mulde gehalten werden. Somit sollte weniger Methanschluß entstehen, da sich kaum Methan im Wandbereich befindet. Abbildung 22 zeigt eine Schichtladung bei 50 % und 100 % Last

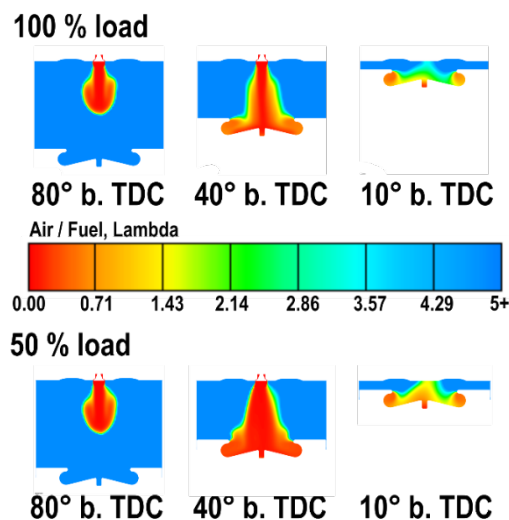


Abbildung 22: Schichtladung bei 50 % und 100 % Last, MD - Verfahren

Das Methan wird in diesem Fall bei 85 °KWvOT eingedüst. Durch die strahlförmige Eindüsung wird der Brennstoff gezielt in die Mulde eingebracht. Die Verwirbelung am Kolbenmuldenrand schließt Luft mit ein, jedoch bleibt das Methan innerhalb der Mulde. Hier findet anschließend die Verbrennung statt.

Eine Variation der Eindüsezeitpunkt wird in Abbildung 23 gezeigt.

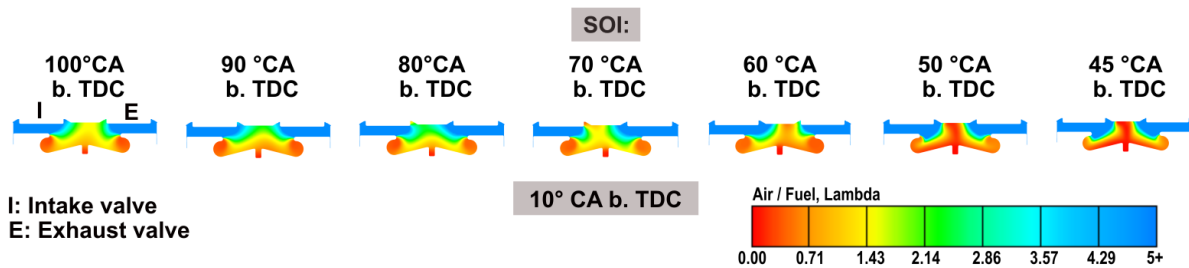


Abbildung 23: Lambdaverteilung im Brennraum um 10 °KWvOT bei verschiedenen Eindüsezeitpunkten, MD-Schichtladungsverfahren bei 50% Motorlast

Bei einer sehr späten Einblasung (50 – 45 °KWvOT) entsteht ein sehr fettes Gemisch in der Mulde. Dieses könnte eine langsame Verbrennung infolge vom lokalen Sauerstoffmangel, oder sogar erhöhten Methanschluß aufgrund von unvollständiger Verbrennung zur Folge haben. Bei einer frühen Einblasung (100 °KWvOT oder früher) hat das Methan die Möglichkeit, aus der Mulde herauszutreten. Hier wäre die erwünschte Wirkung, dass die Mulde das Brenngas von den kalten Brennraumwänden fernhält, zunichte gemacht. Bei 100° KWvOT ist dieser Effekt noch nicht so ausgeprägt, jedoch sieht man einen fetteren Bereich in der Mündung der Mulde. Zwischen ca. 90 °KWvOT und ca. 70° KWvOT liegt der optimale Eindüsezeitpunkt, mit einem aufbereitetem Luft-Kraftstoffgemisch das in der Mulde liegt.

Entwicklung einer angepassten Diesel-Einspritzdüse

Da der Kolbenoberteilgeometrie sehr unterschiedlich zu dem Standard-Kolben ist, wurde auch eine Diesel-Einspritzdüse für dieses Verfahren mithilfe der CFD entwickelt. Diese Düse sollte bewirken, dass über ein breites Einspritzzeitfenster möglichst viel Diesel in den Bereich der Mulde eingebracht wird und das möglichst wenig Diesel über die Kante der Mulde gespritzt wird.

Vorentwicklung MD – Schichtladungsverfahren

Aufgrund der durchgeführten 3D – CFD Simulationen konnte einen geeigneten Kolbenoberteil gefertigt werden und optimale Eindüsestrategien für die Schichtladung identifiziert werden. Diese Vorarbeiten führten maßgeblich zum Erfolg des MD-Schichtladungsbrennverfahrens am Versuchsmotor.

Hochdruckverfahren

Auch für das Hochdruckverfahren konnte die Simulation für die Vorentwicklung erfolgreich verwendet werden. Der neuartige Gas Hochdruckinjektor konnte mithilfe der Simulation vor Übergabe untersucht werden und die bestmögliche Kombination aus Injektor (mit / ohne Strahlführung) und Kolbenkrone identifiziert werden.

Mit der Simulation wurde ersichtlich, dass der Injektor ohne Strahlführung ähnliche Probleme aufweist, wie im Mitteldruckverfahren. Durch den Coandă-Effekt bleibt das Brenngas am Zylinderkopf und breitet sich Richtung Brennraumwand aus, was ungünstig für die Gemischbildung und Verbrennung ist, siehe Abbildung 24.

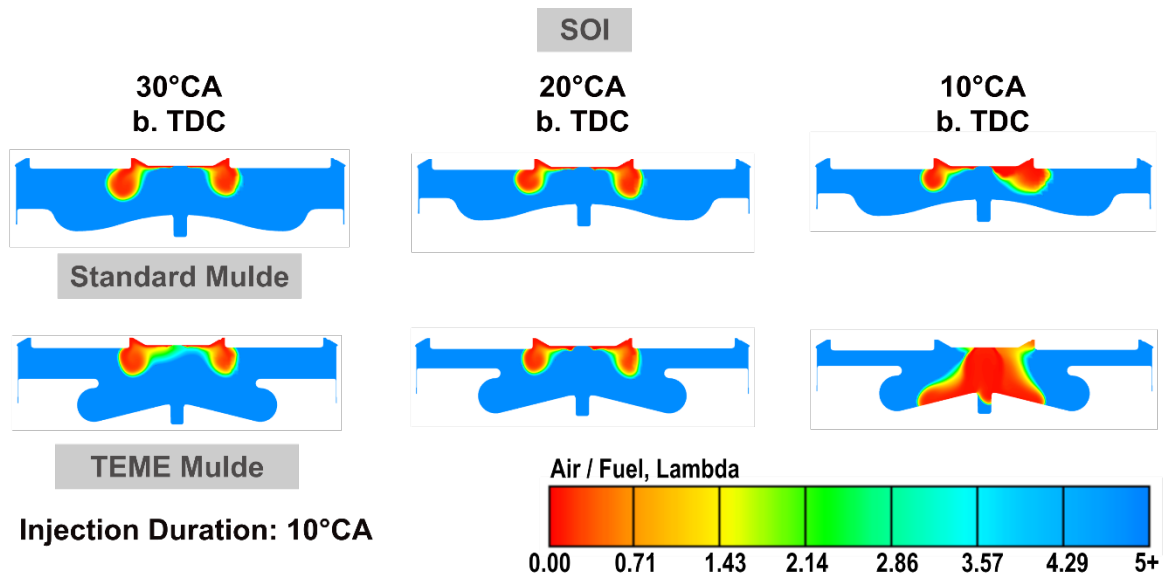


Abbildung 24: Lambda am Ende der Eindüsung, HD-Verfahren ohne Strahlführung, 50 % Last

Hier wird Lambda am Ende der jeweiligen Eindüsung gezeigt, d.h. bei Eindüsungsbeginn 30° KWvOT wird Lambda zum Zeitpunkt 20° KWvOT gezeigt, da die Einblasedauer 10 °KW betrug. Mit beiden Muldenvarianten ist eine Einblasung mit dem Hochdruckinjektor ohne Strahlführung nicht zu empfehlen, da das Brenngas aufgrund der Coandä Effekt am Zylinderkopfboden bleibt und so nicht optimal im Brennraum verteilt wird. Interessant ist hier der Fall mit Eindüsungsbeginn 10° KWvOT mit der TEME Mulde. Aufgrund der Strömungsverhältnisse und dem hohen Druck, der notwendig ist, um das Brenngas in dem Brennraum einzudüsen kann der Coandä Effekt allmählich überwunden werden. Nichtsdestotrotz ist der Gemischbildung über weite Betriebsbereiche unzureichend, weswegen der Betrieb mit Strahlführung zu empfehlen ist. Mit Strahlführung wird das Brenngas direkt in die Mulde eingedüst, siehe Abbildung 25.

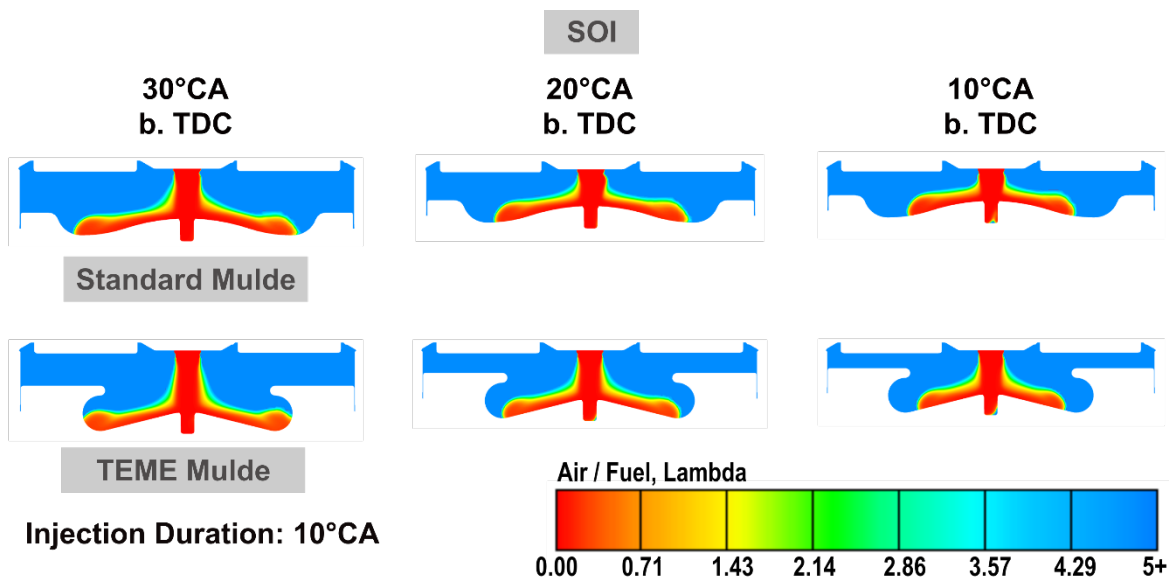


Abbildung 25: Lambda am Ende der Eindüsung, HD-Verfahren mit Strahlführung, 50 % Last

Analog zu Abbildung 25 wird Lambda zum Ende der Eindüsung gezeigt. Mit der Strahlführung ist es möglich, das Brenngas direkt in die Mulde einzubringen. Mit späterer Einblasung breitet sich das Gas aufgrund des höheren Zylinderdrucks nicht so weit aus. Bei dem Standardkolben könnte bei früher Einblasung das Methan die kalte Brennraumwand erreichen, jedoch bei spätere Einblasung reicht die Zeit hierfür nicht aus, sodass einen methanschlußfarmen Betrieb mit beiden Mulden möglich wäre.

Vorentwicklung HD – Verfahren

Somit konnte aufgrund der durchgeführten 3D-CFD Arbeiten eine klare Empfehlung für den Betrieb mit Strahlführung gemacht werden. Hierdurch wurde der Versuchsumfang um ca. 50 % reduziert.

Analyse der Verbrennung

Die Verbrennung des Niederdruckbetriebs wurde mit der Verbrennung bei der MD-Schichtladung und der des HD-Betrieb verglichen. Abbildung 26 zeigt ein Vergleich der simulierten und experimentellen Druckverläufe der drei Verfahren.

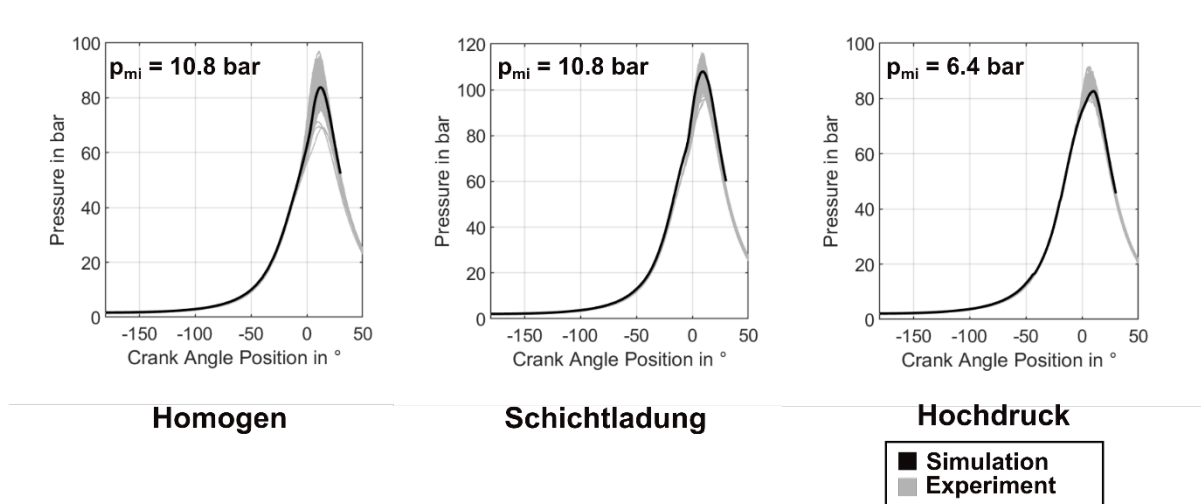


Abbildung 26: Simulierte und experimentelle Druckverläufe, ND, MD, HD

Hierfür wurde der AVL ECFM-3Z Verbrennungsmodell verwendet, ein extended coherent flame model mit 3 Zonen. Über die Tuning Parameter „stretch factor“, welcher die Ausbreitung der Flammfront beeinflusst, „auto ignition parameter“, welcher den Brennbeginn verändert sowie der „mixing model Parameter“, der den Einfluss der Turbulenz auf die Mischvorgänge einstellt, kann das Modell, welches auf tabellierte Chemie basiert, eingestellt werden.

Die Parametrierung des Verbrennungsmodells hat sich durch die langen Zündverzugszeiten, die Mischung von zwei Kraftstoffen mit unterschiedlichen Verbrennungsregimen (Diesel – nicht vorgemischt / Methan – vorgemischt) sowohl die extrem niedrige Flammgeschwindigkeit des Methans im niedrig-Turbulenz Brennkammer als herausfordernd herausgestellt.

Nichtsdestotrotz konnte das Verbrennungsmodell erfolgreich parametrisiert werden, sodass ein Vergleich der drei Verfahren möglich ist. Abbildung 26 zeigt die gute Übereinstimmung der simulierten und experimentellen Druckverläufe. Hier ist der simulierte Druckverlauf im Vergleich zu jeweils 250 gemessenen Zyklen des Experiments gezeigt. Die gemessenen Zyklen zeigen die für Gas-DF Motoren typischen zyklischen Schwankungen. Diese können von einem RANS-basierten Modellierungsansatz nicht wiedergegeben werden. Die simulierten Zyklen liegen aber jeweils gut im mittleren Bereich der jeweiligen Schwankungsbreite der gemessenen Einzelzyklen.

So war es möglich, die Unterschiede bei der Verbrennung bei den verschiedenen Brennverfahren mithilfe der Simulation zu analysieren. Abbildung 27 zeigt die Unterschiede im Brennraumtemperatur bei den verschiedenen Verfahren auf.

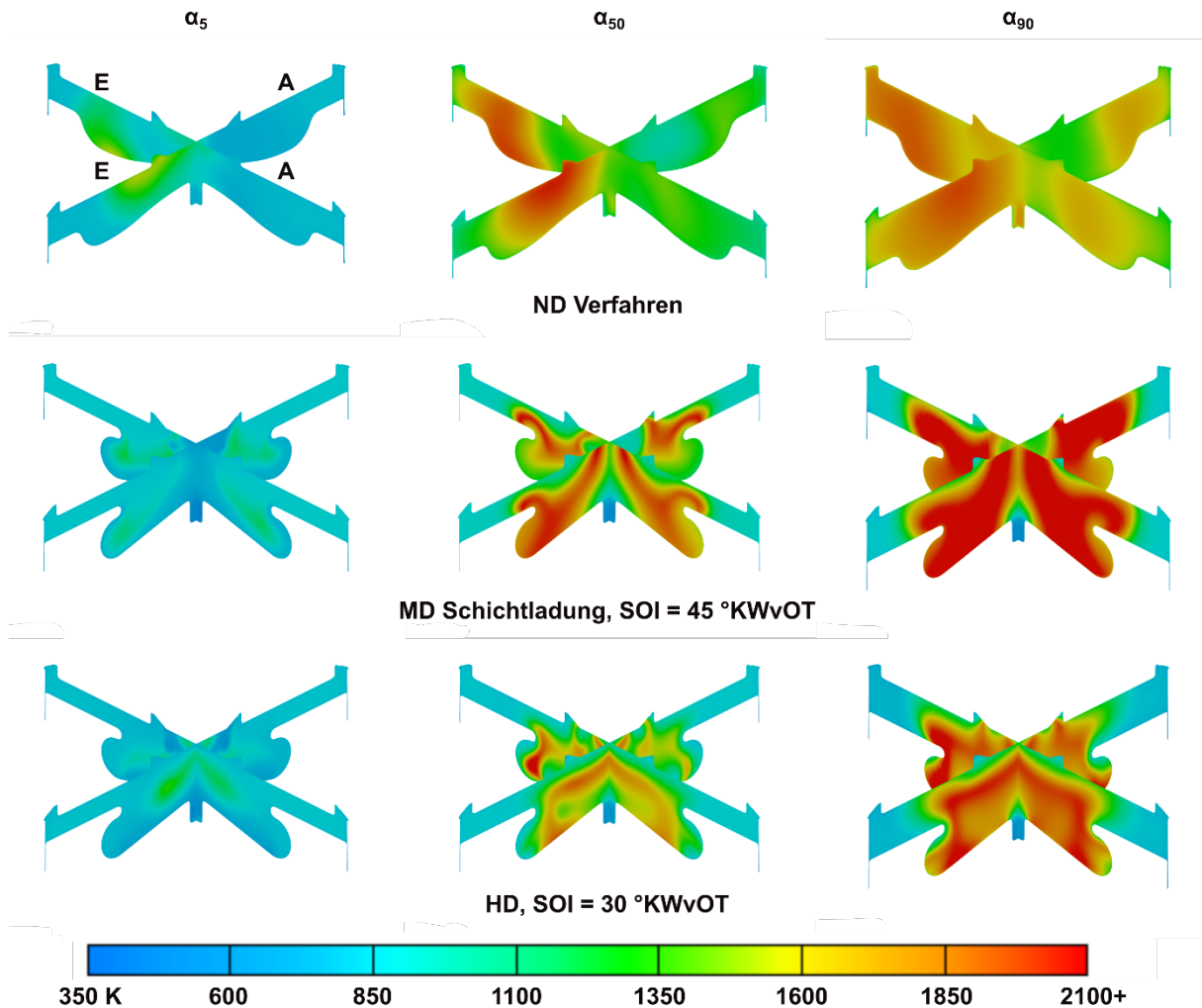


Abbildung 27: Brennräumtemperaturen bei den verschiedenen Brennverfahren ND, MD-Schichtladung, HD, 50 % Last

Hier wird der Brennräumtemperatur bei Brennbeginn (α_5), Verbrennungsschwerpunkt (α_{50}), sowie bei Brennende (α_{90}) präsentiert. Im Niederdruckverfahren werden die höchsten Temperaturen im linken Quadranten erreicht, zwischen den Einlassventilen (E). Der Dieselinjektor sitzt im hinteren Quadranten, zwischen Einlass (E) und Auslassventilen (A). Durch den Diesel- Zündverzug und der Strömungsverhältnissen im Zylinder kommt es um die Zeit des Brennbeginns zu einem leicht fetteren Bereich unterhalb der Einlassventile, welches die höheren Temperaturen verursacht. Bis Brennende entsteht ein (in Vergleich zu den anderen Verfahren) relativ homogenes Temperaturfeld mit kältere Stellen entlang der Brennräumwände, welche eine Ursache für Methanschleup bei dem homogenen Gemisch bilden.

Im Mitteldruck-Schichtladungsverfahren brennt das Methan zunächst in den besser vorgemischten Bereich um den fetteren Bereich in der Mulde, bevor es allmählich in die Muldenmitte hineinbrennt. Die niedrigen Lambdaverhältnisse verursachen sehr hohe Temperaturen innerhalb der Mulde. Im Squish und Wandbereich sind im Vergleich zum ND-Verfahren sehr kühle Bereiche zu verzeichnen, da hier kein Methan vorzufinden ist. Somit ist die thermische Belastung für den Liner geringer, jedoch für Kolben und Ventile höher als bei dem Niederdruckverfahren. Ähnlich verläuft die Verbrennung bei dem Hochdruckverfahren. Hier brennt es kaum in dem Squish-Bereich hinein, da dort kaum Methan hinkommt. Da wenig Vormischung von Luft und Methan stattfindet, fallen die Temperaturen in der Mulde niedriger aus als bei dem MD-Schichtladungsverfahren, jedoch höher als beim Niederdruckverfahren.

Bei der Schichtladung und Hochdruckverfahren bleibt unverbranntes Methan in der Kolbenoberseite-Einbauhilfe (zentrale Bohrung). So sind laut Simulation z.B. 34 mg unverbranntes Methan bei 50 % Last im Schichtladungsbetrieb, 11.6 mg im Hochdruckbetrieb vorzufinden. Beim Niederdruckverfahren verbleiben

vergleichsweise lediglich 0.024mg in der Einbauhilfe. Für zukünftige Kolbenkronen die für einen direkteinblasende Injektor ausgelegt werden, sollte diese Art der Montagehilfe nicht verwendet werden.

Die 3D – CFD Simulation konnte auch genutzt werden, um gemessene Phänomene zu erklären. Bei dem Schichtladungsverfahren, zum Beispiel, gibt es bei späterer Einblasung einen Abfall des Wirkungsgrads. Anhand von der Simulation konnte dieser Effekt nicht nur auf die längere Brenndauer wegen lokalem Sauerstoffmangel in der Mulde, sondern auch auf die erhöhten Wandwärmeverluste am Kolben zurückgeführt werden.

Anhand der gemessenen Laufbuchsentemperaturen konnten die Unterschiede bezüglich der Verbrennung im Squish und Wandbereich auch bestätigt werden. Bei dem Niederdruckverfahren betrug die gemittelte Laufbuchsentemperatur 411 °C, bei dem Mitteldruckbetriebspunkt 399 °C und bei dem Hochdruck Betriebspunkt 386 °C.

Somit konnten gemessene Effekt bei der Verbrennung auch mithilfe der 3D – CFD erklärt werden.

Aufgrund der Neuigkeit der 3D-CFD Untersuchungen wurden bereits viele Ergebnisse veröffentlicht, siehe 2.6 für weitere Details.

2.1.3 AP 3: Dokumentation Basiszustand für Technologieevaluation

Zur Bestimmung des IST-Zustandes wurde nach Abschluss aller zu Projektbeginn erforderlichen Umbaumaßnahmen ein Grundsetup für den Forschungsmotor entwickelt, das den aktuellen technologischen Stand unter Ausnutzung aller Erkenntnisse aus dem Projekt LEDFII abbildet. Dieses Messprogramm umfasst die Durchführung von Versuchsreihen mit Variationen definierter Parameter, um eine umfassende Bewertung des Motors unter standardisierten Bedingungen zu ermöglichen. Ziel dieser Vorgehensweise war es, die unterschiedlichen Technologiepakete diesem Messprogramm zu unterziehen und deren Potenzial aus technologischer, ökologischer und emissionsrelevanter Sicht sowie hinsichtlich des Wirkungsgrades fundiert einschätzen zu können. Als Ausgangsbasis diente der Stand des Niederdruckbrennverfahrens mit äußerer Gemischbildung und ohne Abgasnachbehandlung.

Im Rahmen des Projekts TEME2030+ sowie in der Dissertation von Herrn Karsten Schleef wurden experimentelle Untersuchungen zu unterschiedlichen Brenngaszusammensetzungen durchgeführt. Hierfür erfolgte eine gezielte Zumischung von Propan bzw. Kohlendioxid zum Brenngas mittels einer Gasmischanlage. Die Sensitivitätsanalyse untersuchte dabei die Einflüsse verschiedener Motorparameter bei veränderten Brenngasqualitäten. Aufgrund des Einsatzes eines Pilotkraftstoffs zur Zündung bestehen im Vergleich zu fremdgezündeten Gasmotoren deutlich mehr Stellgrößen, um den Verbrennungsprozess zu beeinflussen.

Ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt im Berichtszeitraum lag auf der abschließenden experimentellen Überprüfung des im Projekt entwickelten und zum Patent [DE102022121793A1] angemeldeten Regelungskonzepts („Piloteinspritzbasiertes Regelungskonzept zur Verwendung unterschiedlichster Brenngasqualitäten an Dual-Fuel-Motoren“). Die Wirksamkeit dieses Konzepts konnte erfolgreich nachgewiesen werden. Im aktuellen Stand der Technik werden Dual-Fuel-Motoren (DF-Motoren) in der Regel auf eine Mindestmethanzahl ausgelegt, die sich aus den zu erwartenden Gasqualitäten entsprechend dem Einsatzprofil eines Schiffes ergibt. Weichen die tatsächlich eingesetzten Brenngaszusammensetzungen davon ab, kommt es bislang zu Wirkungsgradeinbußen oder zu einer Lastreduzierung des Motors (Derating). Das neu entwickelte Regelungskonzept ermöglicht hingegen den flexiblen Betrieb von DF-Motoren bei unterschiedlichen Brenngasqualitäten durch eine angepasste Piloteinspritzstrategie, ohne übermäßige Bauteilbelastungen infolge klopfender Verbrennung oder Einbußen bei Wirkungsgrad und Last hinnehmen zu müssen. Aufgrund der positiven Ergebnisse wurde das Patent nicht nur national, sondern auch international angemeldet; das Verfahren befindet sich derzeit in Bearbeitung.

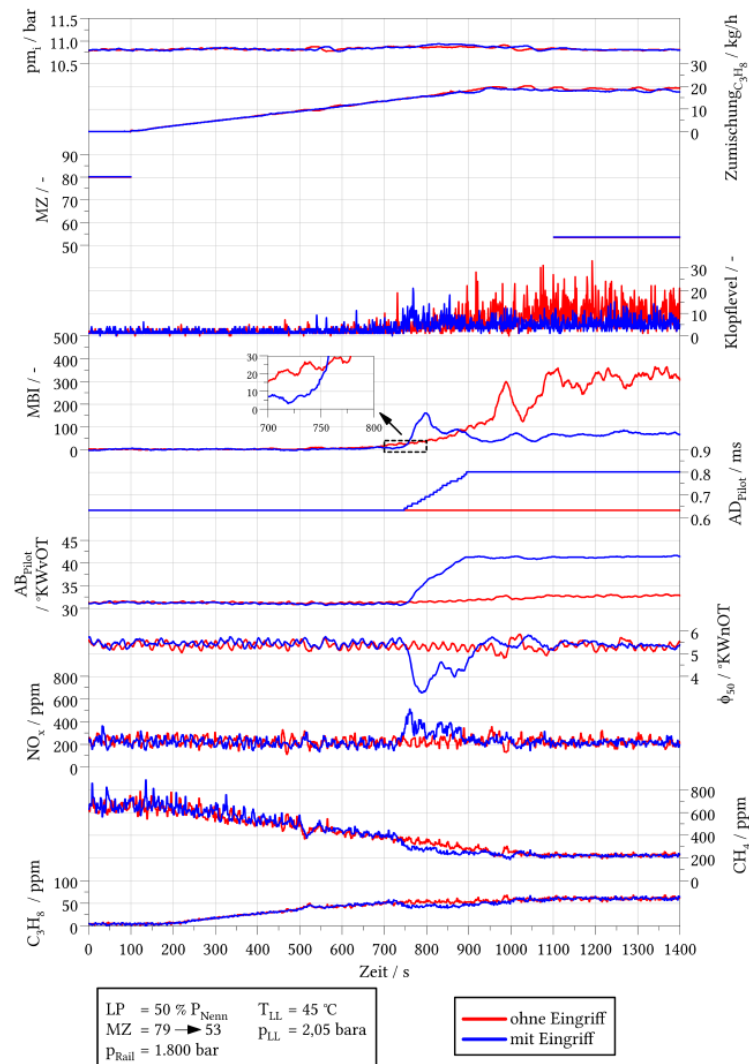


Abbildung 28: Nachweis der Anwendbarkeit des Regelungskonzeptes bei einer Veränderung der Brenngaszusammensetzung (MZ = 79 → 53)

Die prinzipielle Funktionsweise des Regelungskonzeptes wird exemplarisch anhand einer in Abbildung 28 dargestellten Untersuchung verdeutlicht. Hierbei wurde die Methanzahl durch Zumischung von Propan von 79 auf 53 reduziert. Ohne Regeleingriff führte dies zu einem deutlichen Anstieg des Klopflevels, was auch im neu entwickelten Motorbetriebsindex (MBI) zum Ausdruck kam. Der MBI, der neben dem Klopflevel weitere relevante Indizierkennwerte umfasst, dient als zentrale Regelgröße. Im untersuchten Fall reagierte das Regelungssystem mit einer Erhöhung der Pilotinspritzmenge durch Verlängerung der Ansteuerdauer des Pilotinjektors. Dies führte zu einer signifikanten Reduzierung des Klopflevels im Vergleich zur Messung ohne Gegenmaßnahme und verhinderte eine notwendige Lastreduzierung. Für eine zukünftige Optimierung ist jedoch vorgesehen, die Regelung so anzupassen, dass Nebenwirkungen wie die starke Schwerpunktverlagerung der Verbrennung und kurzzeitig erhöhte NO_x -Emissionen vermieden werden. Insgesamt konnte die grundsätzliche Anwendbarkeit des Regelungskonzeptes bei variierenden Methanzahlen erfolgreich demonstriert werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, DF-Motoren für einen weiten Bereich an Brenngaszusammensetzungen auszulegen und so dauerhaft hohe Wirkungsgrade bei gleichzeitig reduzierten Treibhausgasemissionen zu gewährleisten.

2.1.4 AP 4: Analyse der Kurbelgehäuseatmosphäre

Neben der Untersuchung des Einflusses der Wasserstoffzumischrate auf die wichtigsten Kenngrößen hinsichtlich der Verbrennungscharakteristik und Emissionen bei verschiedenen Lastpunkten, war die stetige Überwachung der Gaszusammensetzung (Blow-by) im Kurbelgehäuse, im speziellen der Wasserstoff- und Methankonzentration innerhalb der unteren Explosionsschutzgrenze (LEL), ein weiterer wichtiger Aspekt im Projekt TEME 2030+. Hierbei diente die Detektion der Methan- und Wasserstoffkonzentration als vollumfängliche Zustandsüberwachung des

Kurbelgehäuses hinsichtlich Verschleiß des Kolbenringpakets, Schäden an der Lauffbuchse oder auch initiales Durchblasen nach lokaler Überhitzung im Kolbenboden, welche letztlich immer zu einem erhöhtem Blow-by- und damit zu einer erhöhten (unverbrannten) Gaskonzentration im Kurbelgehäuse führten. Die Konzeptentwicklung und Bereitstellung des Wasserstoff- und Methan- selektiven Gassensors „GasMOS-H2“, erfolgte durch den direkten Kooperationspartner Schaller Automation in enger Zusammenarbeit mit dem LKV.

Im Januar 2023 wurde mit dem Projektpartner Schaller am Einzylinder-Forschungsmotor eine erste Messkampagne mit Wasserstoffzumischung zur Untersuchung der Kurbelgehäuseatmosphäre durchgeführt. Dabei wurde der von Schaller Automation entwickelte Sensorprototyp angeschlossen und getestet. Es konnten erfolgreiche Versuche bei Lastpunkten von 50 % bis 100 % der Nennlast und Zumischraten von bis zu 30 vol.-% durchgeführt werden (Tabelle 3).

Tabelle 3: Messprogramm der Untersuchungen zur Kurbelgehäuseatmosphäre mit Schaller Automation

		H2-Zumischung / Vol.-%			
		0	5	15	30
Motorlast / %	50	A50-Variation	A50-Variation	A50-Variation	A50-Variation
	75	A50-Variation	A50-Variation	A50-Variation	A50-Variation
	100	A50-Variation	A50-Variation	A50-Variation	A50-Variation

Die Erkenntnisse der Versuche konnten von Schaller für die weitere Entwicklung des Sensorkonzepts verwendet werden. Im Oktober 2023 wurde eine weitere H₂-Messkampagne mit Schaller Automation zur Validierung der Ergebnisse sowie zur Weiterentwicklung des Sensors durch Schaller durchgeführt. Die relevanten Messgrößen am Forschungsmotor bezüglich der Kurbelgehäuseatmosphäre sind der Blowby-Volumenstrom, Kurbelgehäusedruck sowie CH₄-Gehalt im Kurbelgehäuse (Messwert einer Gaswarnanlage nur als Richtwert). Die genauen Analysen der Zusammensetzung wurden von Schaller Automation durchgeführt. Dabei konnte zum einen eine lastabhängige Änderung als auch eine Abhängigkeit von der H₂-Zumischung beobachtet werden. Mit steigender Last wurde, wie zu erwarten, ein höheres Blowby beobachtet, was mit einer höheren CH₄-Konzentration im Kurbelgehäuse einhergeht. Ein steigender Wasserstoffanteil im Brenngas führt zum einen durch die Substitution von CH₄ und zum anderen durch das bessere Durchbrandverhalten zu einer geringeren CH₄-Konzentration im Kurbelgehäuse, während der H₂-Gehalt im Kurbelgehäuse steigt. In Abbildung 29 ist exemplarisch ein Tagesverlaufdiagramm eines Messtages mit Anhebung der Motorlast von 50 auf 100 %, sowie anschließend steigender H₂-Zumischung dargestellt. Anhand der Tagesverlaufsmessungen konnten die von Schaller gezogenen Proben dem Motorbetriebspunkt zugeordnet werden und mit den Messwerten vom Forschungsmotor verknüpft werden. Inhaltlich lag der Schwerpunkt des Arbeitspakets auf Seiten von Schaller Automation, entsprechend finden sich im Abschlussbericht des Projektpartners also mehr Details zur eigentlichen Sensorentwicklung.

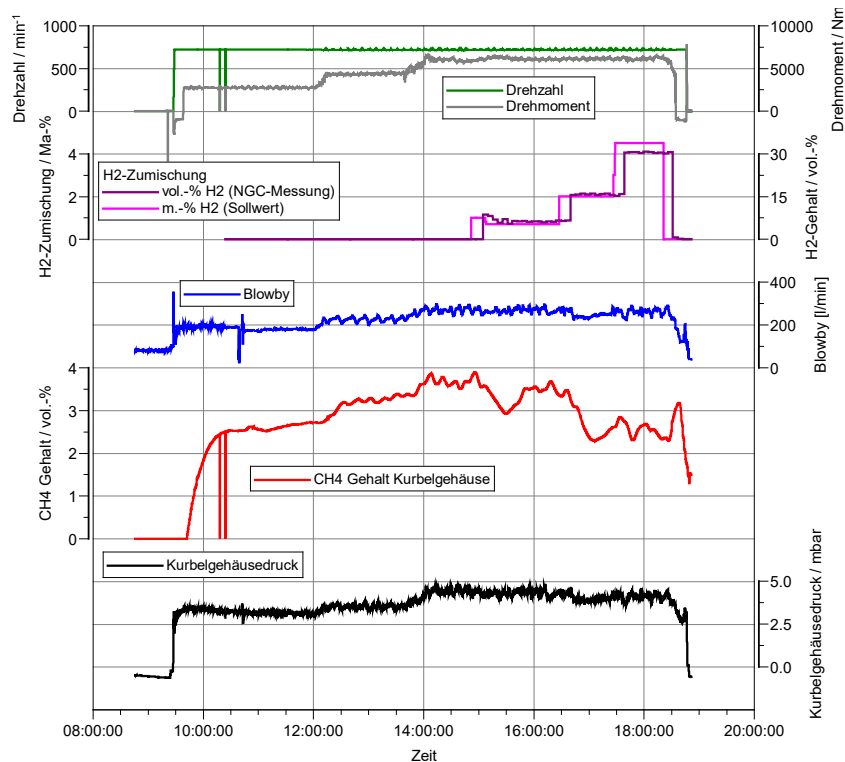


Abbildung 29: exemplarische Tagesverlaufsmessung von Prüfstandsmessgrößen zur Beschreibung der Kurbelgehäuseatmosphäre

Die Untersuchung des Versuchsträgers erfolgte innerhalb mehrerer Messkampagnen, sukzessive am Forschungsmotor 1/34DF des LKV gemäß nachfolgender Abbildung.



Abbildung 30: Versuchsaufbau (Setup) mit GasMOS- H2 Prototyp (rechts) am Einzylinderprüfstand des LKV

Im Jahr 2024 konnten zwei weitere Messkampagnen zur Analyse der Atmosphäre im Kurbelgehäuse mit Projektpartner Schaller am Einzylinder-Forschungsmotor durchgeführt werden. Bei der Versuchsdurchführung wurden zunächst Untersuchungen im MD-Brennverfahren und anschließend Validierungsmessungen im ND-Brennverfahren durchgeführt. Damit konnten zum einen die beiden Brennverfahren direkt gegenübergestellt werden und gleichzeitig konnte eine Vergleichbarkeit zu den vorherigen Messkampagnen hergestellt werden, um die Weiterentwicklung des Sensors bewerten zu können.

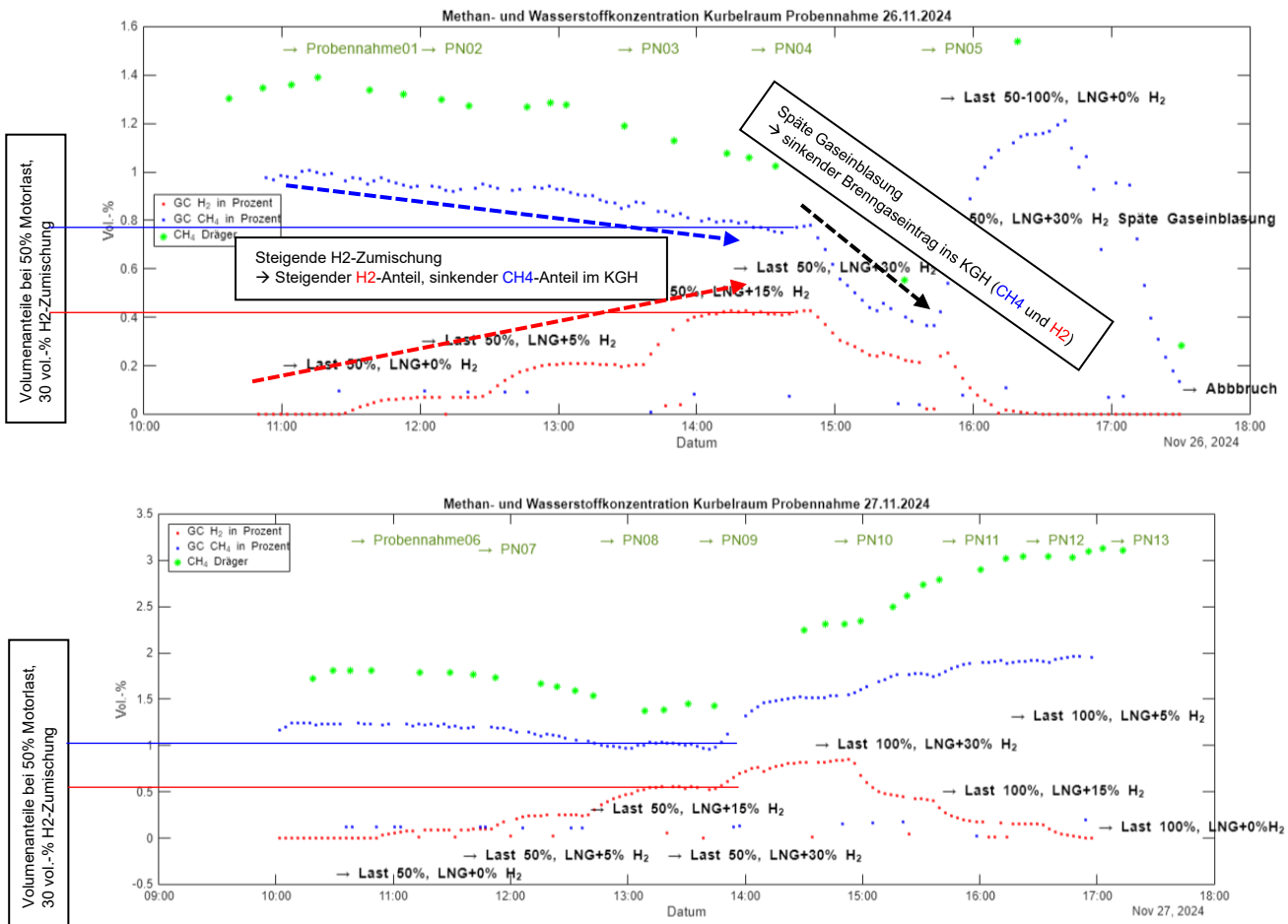


Abbildung 31: Analyse und Validierung der Kurbelgehäuse-Atmosphäre im MD-Homogen-Brennverfahren (oben, 50 % Last, steigende H₂-Zumischung, dann spätere Gaseinblasung) sowie im ND-Brennverfahren (50 % Last, steigende H₂-Zumischung, dann 100 % Last und sinkende H₂ Zumischung)

Ausgewählte Erkenntnisse kurz zusammengefasst:

- Steigende H₂-Zumischung führt zu steigendem H₂-Anteil und sinkendem CH₄-Anteil im Kurbelgehäuse
- Steigende Last führt zu mehr Blowby → mehr unverbranntes Brenngas im Kurbelgehäuse
- Niedrigere H₂ und CH₄ Anteile bei MD-Brennverfahren → geringere Verluste von unverbranntem Kraftstoff übers Blowby
- Einblasezeitpunkt beeinflusst Blowby-Zusammensetzung: spätere Gaseinblasung → weniger Kraftstoffverluste übers Blowby (korreliert mit CFD-Simulationen zur Gemischbildung: weniger Brenngas in den Randbereichen des Brennraums)

Der Methananteil im Blowby wird am Prüfstand standardmäßig von einem Sensor der Gaswarnanlage überwacht, welcher keine genaue Emissionsmessung ermöglicht, sondern lediglich als Richtwert zur Einschätzung der Größenordnung dienen kann. Die Werte konnten mithilfe des Blowby-Meters in spezifische Werte umgerechnet werden und liegen in einer Größenordnung von ca. 30 mg/kWh, also ca. 1-3% des Methanschlupfs im Abgas. Die genaueren Gasanalysen von Schaller zeigen, dass der Sensor den Volumenanteil tendenziell um den Faktor 1,5 bis 2 überschätzt, die realen Werte für den Methanschlupf über das Blowby liegen also nochmal niedriger. Da das Blowby in Marineanwendungen typischerweise nicht dem Motor wieder zugeführt wird, trägt also auch der Methanschlupf im Blowby zu den Treibhausgasemissionen eines DF-Motors bei. Anhand der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der Anteil an den Gesamt-THG-Emissionen jedoch sehr gering ist, der positive Einfluss der Gasdirektinblasung auf den Methanschlupf über das Blowby ist also gegenüber den direkten Emissionen über das Abgas nicht entscheidend.

Entsprechend der beobachteten Effekte des Einblasezeitpunkts konnten auch die unterschiedlichen Brennverfahren (ND/MD/HD) in Bezug auf die Kurbelgehäuseatmosphäre untersucht werden. Das MD-

Brennverfahren wird hierfür nochmal in zwei unterschiedliche Herangehensweisen unterteilt: Homogenbetrieb (MD-H) und Schichtladung (MD-SL). Mehr Details zu den Brennverfahren mit Gasdirekteinblasung sind in den Kapiteln zu AP7 zu finden. Hier soll lediglich auf den Einfluss auf die Kurbelgehäuseatmosphäre eingegangen werden.

Im MD-Homogen-Brennverfahren mit früher saugsynchroner Gaseinblasung verteilt sich das Brenngas gut im Brennraum, sodass schon während der Verdichtung auch im Feuerstegbereich Brenngas vorliegt. Dadurch enthält das Blowby unverbrannten Kraftstoff, welcher dann im Kurbelgehäuse wiederzufinden ist. Mit der am Einzylindermotor installierten Kurbelgehäusebelüftung (Absaugung und Frischluftzufuhr) blieben die Werte unterhalb der unteren Explosionsgrenze (sowohl bei Wasserstoff als auch bei Methan). Ohne aktive Belüftung würde die untere Explosionsgrenze überschritten werden. Die grundlegenden Einflüsse verschiedener Parameter (Lastpunkt, Lambda, H₂-Zumischung, ...) verhalten sich wie im ND-Brennverfahren.

Im MD-Schichtladungsbrennverfahren kommt es nur bei sehr frühen Einblasezeitpunkten zu unverbranntem Brenngas im Kurbelgehäuse (Abbildung 32). Das Ziel der Betriebsstrategie, das Brenngas von den kalten Brennraumwänden fernzuhalten, führt also gleichzeitig dazu, dass kein unverbranntes Brenngas ins Kurbelgehäuse gelangt. Die frühen Einblasezeitpunkte (vor 100 °KWvOT) sind für das Schichtladungsbrennverfahren generell nicht sinnvoll (vgl. AP 7.1). Das Ziel, das Brenngas von den Brennraumwänden fernzuhalten, kann dann nicht erreicht werden, was zu hohen Methanschlepp-Werten und Konzentrationen im KGH führt. Ein System zur Überwachung der Kurbelgehäuseatmosphäre könnte dann neben den Sicherheitsaspekten auch indirekt zur Kontrolle verwendet werden, ob die eingestellte Einblasestrategie das Ziel der Schichtladung erreicht.

Gleiches gilt auch für das HD-Brennverfahren. Durch die noch spätere Gaseinblasung und die Diffusionsverbrennung gelangt kein unverbranntes Brenngas in die Randbereiche des Brennraums und dadurch bleibt auch der Anteil unverbrannten Brenngases im Kurbelgehäuse unter der Nachweisgrenze.

Mithilfe der Messkampagnen im Rahmen des AP4 – Analyse der Kurbelgehäuse-Atmosphäre konnten also umfangreiche Kenntnisse über die Kurbelgehäuseatmosphäre bei unterschiedlichen Brennverfahren sowie Brenngasen mit Wasserstoffzumischung erlangt werden. Der GasMOS H₂ Prototyp und die genauen Gasanalysen (im Labor oder per Gaschromatograph) konnten weiterhin dazu verwendet werden, die prüfstandsseitig vorhandene Sicherheitstechnik (Dräger Gaswarnsensor) zu plausibilisieren und den Einfluss von unverbranntem Brenngas in der Kurbelgehäuseentlüftung auf die Gesamtreibhausgasemissionen zu quantifizieren.

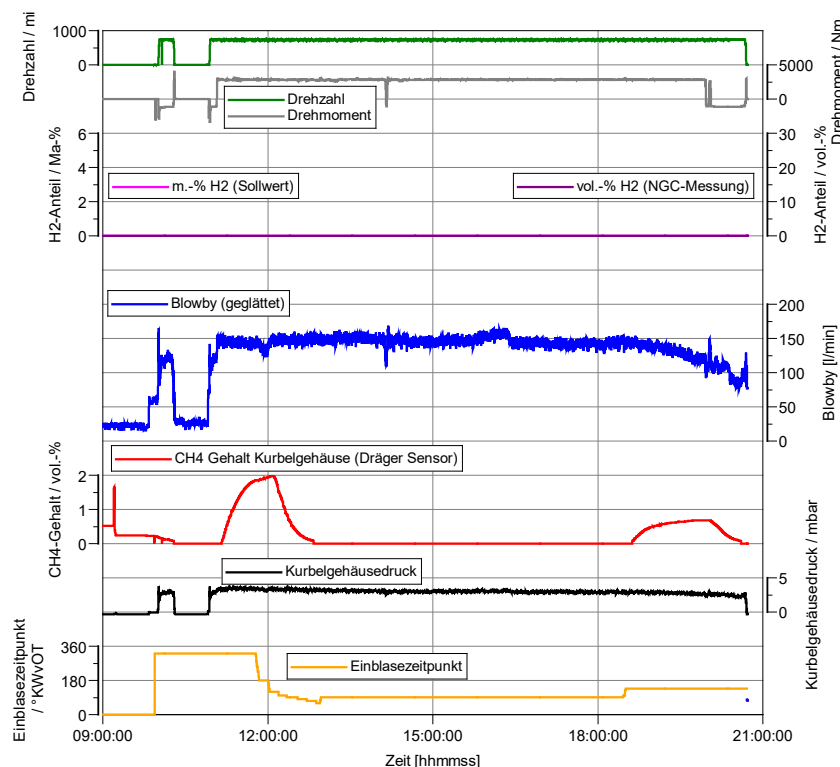


Abbildung 32: Tagesverlaufsdatei zur Analyse der Kurbelgehäuseatmosphäre im MD-Schichtladungsbrennverfahren

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine aktuelle Online- Auswertung von GasMOS-H2 aus der Messkampagne vom Juli 2025, in welchem zeitgleich Methan (CH₄, blauer Graph) und Wasserstoff (H₂, roter Graph) innerhalb einer Messkampagne detektiert und offsetkorrigiert aufgezeichnet wurden. Als Referenzquelle wurde zusätzlich ein Online- Gaschromatograph (Methan: blaue Punkte; Wasserstoff: rote Punkte) verwendet. Das Gesamtergebnis zeigt deutlich, dass im Vergleich mit der gemessenen Konzentration von CH₄ des GC und GASMOS-H₂ eine sehr hohe Übereinstimmung vorliegt. Die Abweichung des GASMOS CH₄- Messwertes zum CH₄- Messwert des Gaschromatographen, beträgt kleiner 0,01vol.% CH₄. Im Vergleich zur H₂- Konzentration konnte eine maximale Abweichung des Messwertes zwischen GASMOS-H₂ und Gaschromatographen von kleiner 0,05 vol.% H₂ festgestellt werden.

Insgesamt zeigen die gemessenen Konzentrationswerte von H₂ und CH₄ eine sehr hohe Übereinstimmung mit den jeweiligen Referenzsystemen, sodass die grundsätzliche des Arbeitspakets dadurch bestätigt und eines der Hauptziele erfolgreich erreicht wurde.

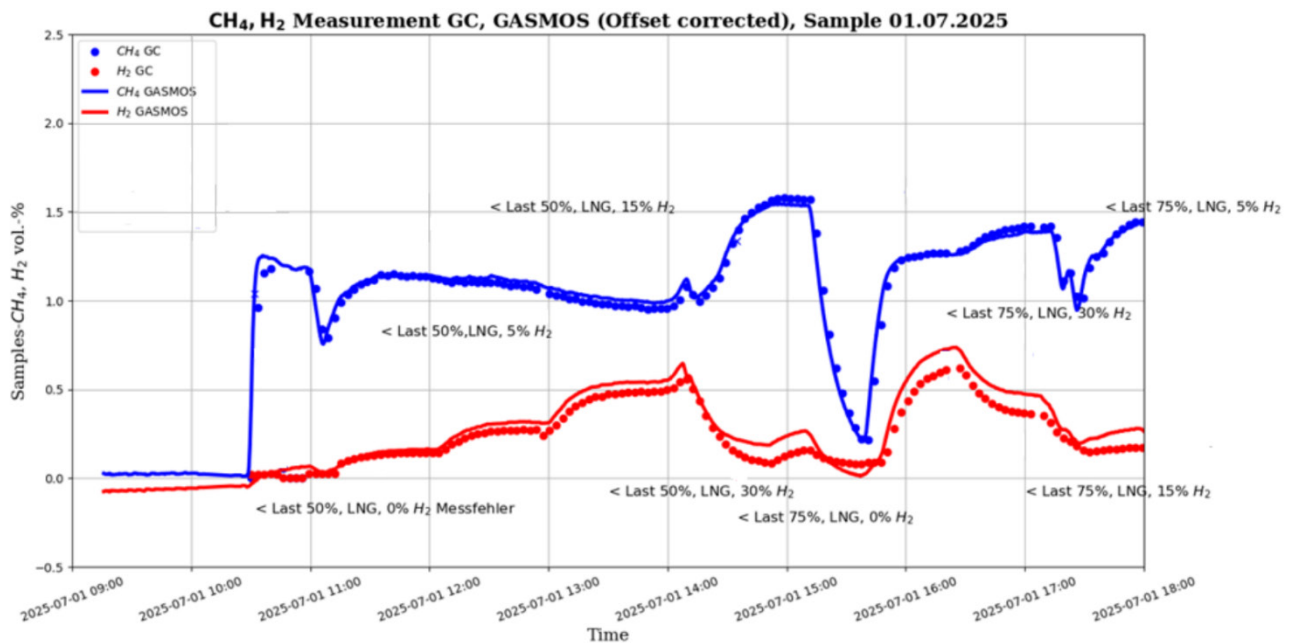


Abbildung 33: Ergebnis der Messungen der Kurbelgehäuseatmosphäre mit dem GasMOS System sowie einem Gaschromatographen als Referenz

2.1.5 AP 5: Potenzialanalyse Einzelmaßnahmen ND-Gas-Saugrohreinblasung

Das Arbeitspaket „Potenzialanalyse Einzelmaßnahmen ND-Gas-Saugrohreinblasung“ hatte zum Ziel, die technischen und ökologischen Optimierungsmöglichkeiten des bereits weit verbreiteten Niederdruck-Dual-Fuel-Motorenkonzepts systematisch zu untersuchen und stellt damit die erste der drei Haupt-Projektsäulen dar. Im Fokus standen dabei sowohl innermotorische Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und Emissionsminderung als auch nachgelagerte Abgasnachbehandlungstechnologie. Die Analysen umfassten das Potenzial eines veränderlichen Verdichtungsverhältnisses, den Einsatz eines Methanoxidationskatalysators zur nachmotorischen Methanreduktion, die Untersuchung variabler Ventilsteuerung sowie die Integration von Abgasrückführung. Ergänzend wurde die Wirkung nachhaltiger Kraftstoffe wie Wasserstoff im Niederdruck-Saugrohreinblasungskonzept bewertet. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für eine ganzheitliche Einschätzung der technischen Potenziale und der Relevanz der Einzelmaßnahmen im Hinblick auf zukünftige Anforderungen an Effizienz und Emissionsminderung in der Motorenentwicklung. In den folgenden Abschnitten werden die Anpassungen der Prüfstandsinfrastruktur und die Ergebnisse der Untersuchungen der unterschiedlichen Technologiekonzepte vorgestellt.

2.1.6 AP 5.1: Untersuchung veränderlicher Verdichtungsverhältnisse

Im Arbeitspaket 5.1 stand die Untersuchung veränderlicher Verdichtungsverhältnisse im Fokus (VCR = variable compression ratio). Ansatz ist die betriebspunktabhängige Änderung des Verdichtungsverhältnisses während des

Betriebs. Von Kleinmotoren sind Systeme zur aktiven Verstellung der geometrischen Verdichtung bekannt, und auch für Großmotoren gibt es Entwicklungsansätze für eine Änderung des Verdichtungsverhältnisses beispielsweise durch eine hydraulische Verdrehung eines Exzenters im oberen Pleuelauge. Da ein solches System mit hohen Kosten einhergeht, wurde für die Untersuchungen im Rahmen des Projekts TEME2030+ ein vereinfachter Ansatz ausgewählt, bei dem durch Distanzscheiben bzw. Epsilonscheiben die Pleuellänge und damit das Kompressionsvolumen verändert werden kann. Der Ansatz für die Untersuchungen zum erhöhten Verdichtungsverhältnis bestand darin, ein VCR-System zu simulieren, um die Effizienz zu steigern, wenn der Motor mit geringerer Last läuft. Das Ziel besteht darin, die Treibhausgasemissionen und Betriebskosten durch gesenkten Kraftstoffverbrauch und reduzierte CO₂-Bepreisung zu senken. Vorläufige Untersuchungen seitens der FVTR GmbH wurden mit einem 0D/1D-Modell des Motors durchgeführt, um den Bereich des Verdichtungsverhältnisses zu definieren, der am Motor untersucht werden sollte. Die Ergebnisse des Klopfmodells sind in Abbildung 34 dargestellt.

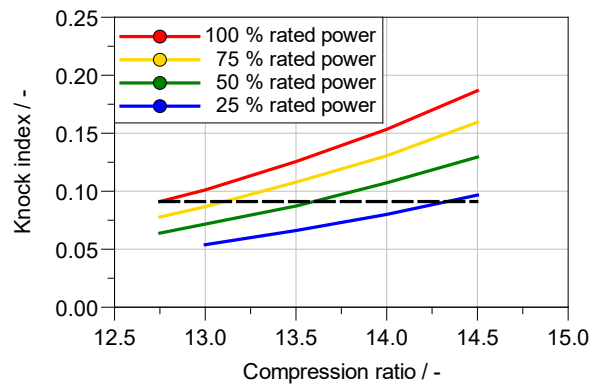


Abbildung 34: Ergebnisse des 0D/1D Klopfmodells für verschiedene Lastpunkte in Abhängigkeit des Verdichtungsverhältnisses

Da Klopfen der wichtigste begrenzende Faktor für die Konstruktion von Dual-Fuel-Motoren ist, wird der Klopfindex bei Vollast mit einem bekannten Kompressionsverhältnis von CR = 12,75 als zulässiges Maximum angesehen. Die Ergebnisse der 0D/1D-Simulation zeigten, dass am niedrigsten Lastpunkt theoretisch Verdichtungsverhältnisse von bis zu 14,5 mit nur einer geringen Zunahme des Klopfens im Vergleich zu Vollast mit Standard CR verwendet werden könnten. Bei 50 % Motorlast würde ein CR von etwa 13,5 zu Klopfwerten führen, die nahe am betrachteten Maximum liegen. Die 0D/1D-Simulation ergab einen Wirkungsgradvorteil von 1,3 % (ca. 0,5 Prozentpunkte) unter Berücksichtigung des Testzyklus für Schiffsanwendungen vom Typ E2 bei einem CR = 13,5 für die beiden unteren Lastpunkten. Die Lastpunkte wurden für den Mittelwert auf der Grundlage von Tabelle 4 gewichtet.

Tabelle 4: Gewichtungsfaktoren zur Berechnung der Mittelwerte für das gesamte Lastprofil bei konstanter Drehzahl (Generatorkurve) gemäß E2-Prüfzyklus für Schiffsanwendungen

Lastpunkt	%	25	50	75	100
Gewichtungsfaktor	-	0.15	0.15	0.5	0.2

Im Rahmen der Untersuchungen wurde diesbezüglich auch das 0D/1D Modell validiert und optimiert, um verschiedene Verdichtungsverhältnisse, Lastpunkte und Verbrennungsschwerpunkte simulieren zu können. Abbildung 35 zeigt exemplarisch die gute Übereinstimmung der Simulation mit gemessenen Druck-/Heizverläufen.

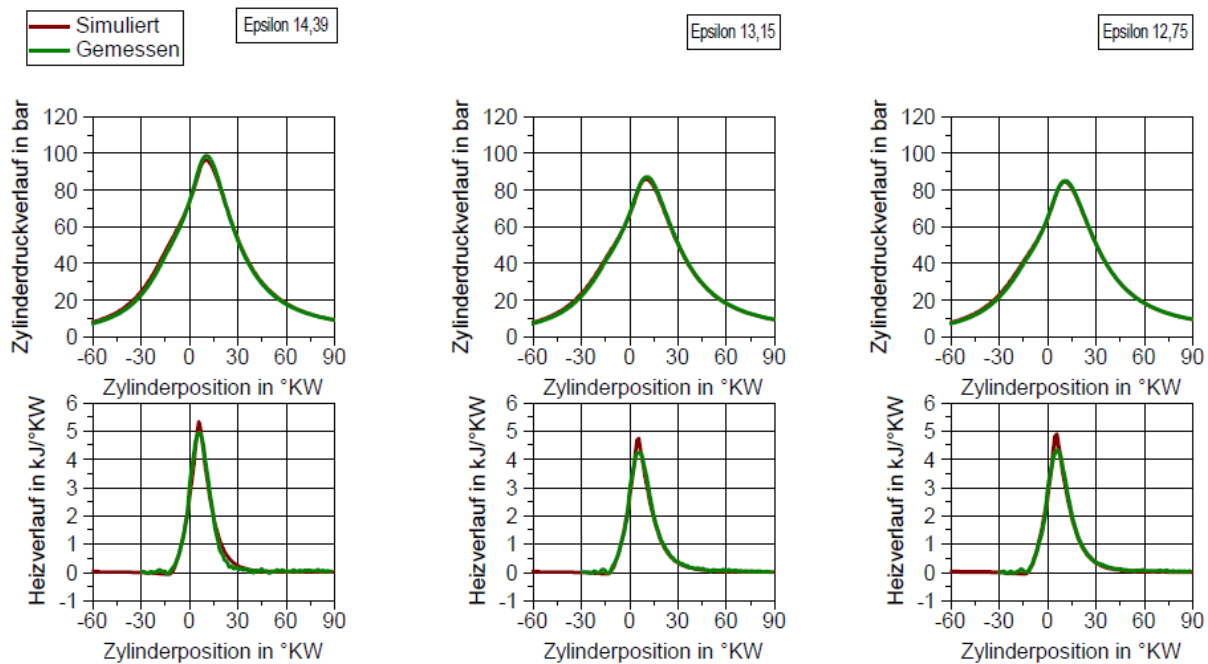


Abbildung 35: Vergleich zwischen OD/1D Simulation und Messungen nach Optimierung/Validierung des Motormodells

Durch die Kombination von verfügbaren Epsilonscheiben und Kolbenoberteilen standen die Verdichtungsverhältnisse 12,75 (Basis) sowie 13,15 und 14,39 für experimentelle Untersuchungen zur Verfügung. Da das Ziel dieses Technologiepakets im Rahmen des Forschungsprojekts TEME2030+ darin besteht, die Effizienz bei niedrigeren Lastpunkten zu verbessern, wurden die Versuche überwiegend bei 25 % und 50 % Motorlast durchgeführt. Mit dem Verdichtungsverhältnis 13,15 konnte der Motor auch bei 75 % Motorlast mit akzeptablen Klopffwerten betrieben werden. Zusätzlich wurden höhere Verdichtungsverhältnisse rein simulativ betrachtet.

In Abbildung 36 ist die detaillierte Analyse mehrerer Messreihen mit den oben genannten Verdichtungsverhältnissen bei 50 % Motorlast und Betriebsparametern entsprechend Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Betriebsparameter für Untersuchungen der Auswirkungen des Verdichtungsverhältnisses bei verschiedenen Lastpunkten in der folgenden Abbildung

Last	%	50
p_{mi}	bar	10.8
CoC	°KWnOT	variiert
p_{CA}	bar _{abs}	2.05
T_{CA}	°C	45
PQ	mg/shot	70 85
	e.-%	≈3.2 ≈3.8
p_{Rail}	bar	1200

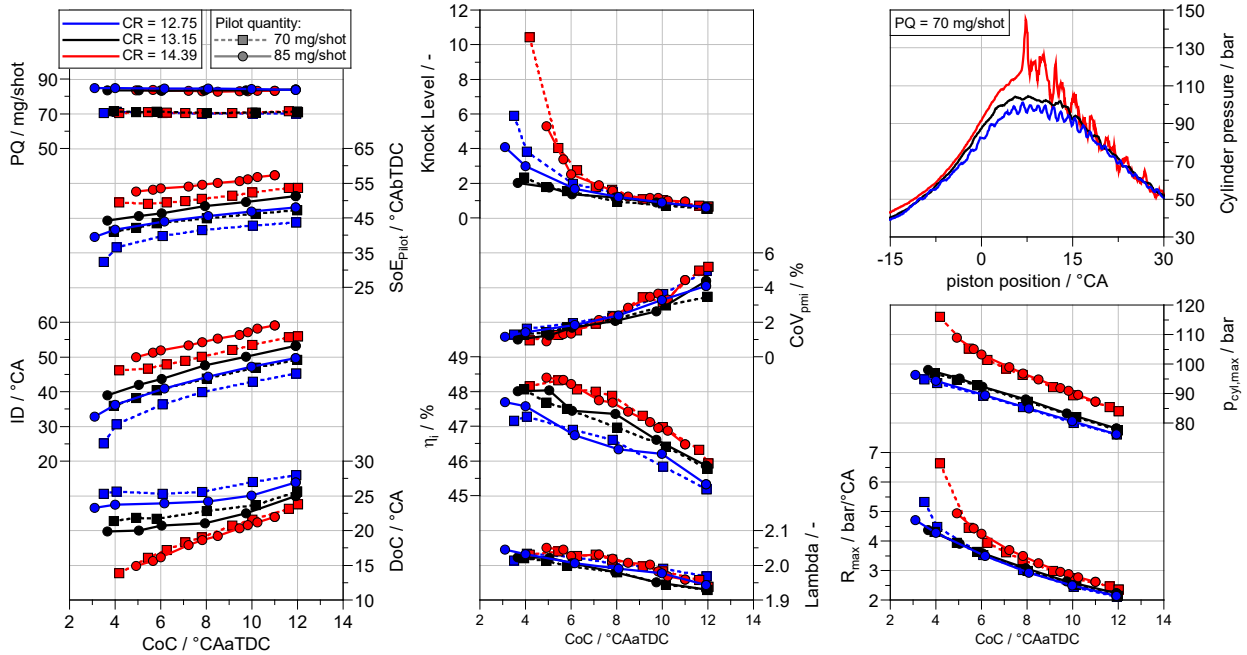


Abbildung 36: Einfluss des Verdichtungsverhältnisses basierend auf Variationen des Verbrennungsschwerpunkts bei unterschiedlichen Pilotkraftstoffmengen bei 50 % Motorlast.

Bei einem erhöhten Verdichtungsverhältnis lassen sich folgende Effekte beobachten:

- Die Verbrennungsdauer (DoC) verkürzt sich aufgrund der höheren Drücke und damit höheren Temperaturen während der Verbrennung. Während bei niedrigeren Verdichtungsverhältnissen eine höhere Pilotmenge die Brenndauer ebenfalls um 1–2 °CA verkürzt, hat die Differenz in der Pilotmenge beim höchstem CR keinen signifikanten Einfluss mehr. Bei höheren Verdichtungsverhältnissen und dadurch verbesserten Brennbedingungen könnte somit also potenziell die Pilotmenge reduziert werden, was zu reduzierten CO₂ Emissionen aus dem meist fossilen Flüssig-Pilotkraftstoff führen würde.
- Ein unerwarteter Effekt war beim Klopfniveau zu beobachten: Bei frühen Schwerpunkten war das Klopfniveau bei einem CR von 13,15 niedriger als bei 12,75. Bei einem CR von 14,39 steigt das Klopfniveau in Richtung früher CoC-Werte stark an. Von 8 °KWnOT in Richtung späterer CoC-Werte gibt es keinen signifikanten Unterschied mehr zwischen den unterschiedlichen Verdichtungsverhältnissen.
- Der erste Schritt bei CR führt zu einem Effizienzgewinn von ca. 0,5 Prozentpunkten über den gesamten CoC-Bereich. Der zweite Schritt führt zu fast dem gleichen Vorteil, obwohl der Anstieg vom Verdichtungsverhältnis deutlich größer ist als im ersten Schritt.
- Im Diagramm unten rechts sind die Mittelwerte für den Spitzendruck und den maximalen Druckgradienten dargestellt, um den Anstieg aufgrund der Änderung des CR zu quantifizieren. Von 12,75 bis 14,39 steigt der Spitzendruck um ca. 10 bar und der Druckgradient um ca. 0,5 bar/°CA. Da es sich nur um einen Teillastbetriebspunkt handelt, ist bis zur zulässigen Grenze noch viel Spielraum vorhanden, und keiner dieser Anstiege ist kritisch. Bei frühen Schwerpunktlagen nimmt der Unterschied aufgrund des stärkeren Klopfens zu.
- Um den unerwarteten Effekt auf das Klopfniveau zu untersuchen, ist im Diagramm oben rechts der einzelne Zyklus mit dem höchsten Klopfniveau für jedes CR dargestellt. Bei einem Verdichtungsverhältnis von 14,39 ist eine deutliche Klopfverbrennung mit einer Klopfamplitude von über 20 bar zu beobachten. Bei der niedrigsten Verdichtungsverhältnis beginnen die Druckschwankungen deutlich vor dem oberen Totpunkt. Dies konnte auf durch die Dieselizeündung ausgelöste klingelnde Verbrennung zurückgeführt werden, die fälschlicherweise als Klopfen interpretiert wird, jedoch nicht so schädlich ist. Bei mittlerer Verdichtungsrate sind nur sehr schwache Schwankungen zu beobachten, die insgesamt den niedrigsten Klopfwerten entsprechen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich für 25 und 50 % Last ein theoretisch verfügbarer Wirkungsgradvorteil von etwa 1 bis 2 Prozentpunkten durch eine Erhöhung des CR von 12,75 auf 14,39 für die niedrigeren Lastpunkte nachgewiesen wurde.

Der Ansatz bestand darin, das Verdichtungsverhältnis unter Berücksichtigung des Klopfens als begrenzenden Faktor zu erhöhen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein deutlich stärkeres Klopfen nur bei 50 % Last bei frühem CoC auftrat. Bei 50 % Last und einem CoC von 8 °KWnOT oder später sowie bei 25 % Last über den gesamten CoC-Bereich lagen die Klopfwerte bei erhöhtem CR auf dem gleichen Niveau oder waren sogar niedriger.

Wenn das Klopfen jedoch zu stark wird, kann eine Verschiebung zu einem späteren Schwerpunkt in Betracht gezogen werden. Bei 50 % Last und einem Standard-Verdichtungsverhältnis von 12,75 könnte der Motor beispielsweise bei einem CoC von 4 °KWnOT mit einem akzeptablen Klopfniveau betrieben werden. Ein erhöhter CR von 14,39 bei gleicher Schwerpunktlage würde den Klopfgrenzwert von 10 überschreiten. Daher kann der Schwerpunkt um 1-2 °KW verzögert werden, um das Klopfen zu reduzieren und gleichzeitig einen erheblichen Effizienzvorteil zu erhalten.

Die unerwarteten Ergebnisse hinsichtlich des teilweise abnehmenden Klopfniveaus bei höheren Epsilonwerten lassen sich mit Hilfe der Untersuchungen zum Auftreten von Klingel- und Klopfverbrennung in Dual-Fuel Motoren im Rahmen der Entwicklung des Regelungskonzepts für variierende Gaszusammensetzungen erklären. Beispielsweise führte die Variation des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses, das ebenso wie das Verdichtungsverhältnis die gesamten Verbrennungsbedingungen beeinflusst, zu starkem Klopfen bei niedrigen Werten und unerwartet steigenden Klopfwerten bei hohen Werten. Diese höheren Klopfwerte konnten auf eine klingelnde Verbrennung zurückgeführt werden, die fälschlicherweise als Klopfen interpretiert wurde. Die klingelnde Verbrennung, die sich auch als Schwingung im Zylinderdruck äußerte, wurde durch die späten Piloteinspritzzeitpunkte verursacht, die für eine frühe Schwerpunktlage bei schlechten Zündbedingungen durch das magere Gemisch erforderlich war.

Es konnte nachgewiesen werden, dass diese Korrelation auch bei einem variablen Verdichtungsverhältnis gilt. Daraus lässt sich weiter ableiten, dass es für jeden Lastpunkt ein optimales Verdichtungsverhältnis gibt und dass der Regelungsansatz auf Basis einer angepassten Piloteinspritzstrategie, der ursprünglich für wechselnde Gasqualitäten entwickelt wurde, auch auf den Einsatz von VCR-Systemen oder möglicherweise andere Technologiekonzepte angewendet werden kann, was das Anwendungsfeld eines solchen Regelungskonzepts deutlich erweitern könnte.

Die Kombination verschiedener Gasqualitäten und eines variablen Verdichtungsverhältnisses unter Verwendung eines kombinierten Steuerungsansatzes würde mehr Vorteile in Bezug auf höchste Effizienz bei verschiedenen Gasqualitäten bieten, da das Verdichtungsverhältnis der wichtigste Auslegungsparameter ist, der in direktem Zusammenhang mit der erwarteten Gaszusammensetzung steht, da die Gasqualität und -zusammensetzung einen direkten Einfluss auf die Klopfwerte hat.

Mithilfe zusätzlicher Messreihen, hier am Beispiel von Lambdavarationen bei 50 % Last dargestellt, konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere bei höheren Lambdawerten zusätzlich zu den Wirkungsgradvorteilen auch der Methanschlupf durch die besseren Brennbedingungen reduziert werden konnte. Bei den NO_x Emissionen wurde währenddessen kein signifikanter Einfluss beobachtet.

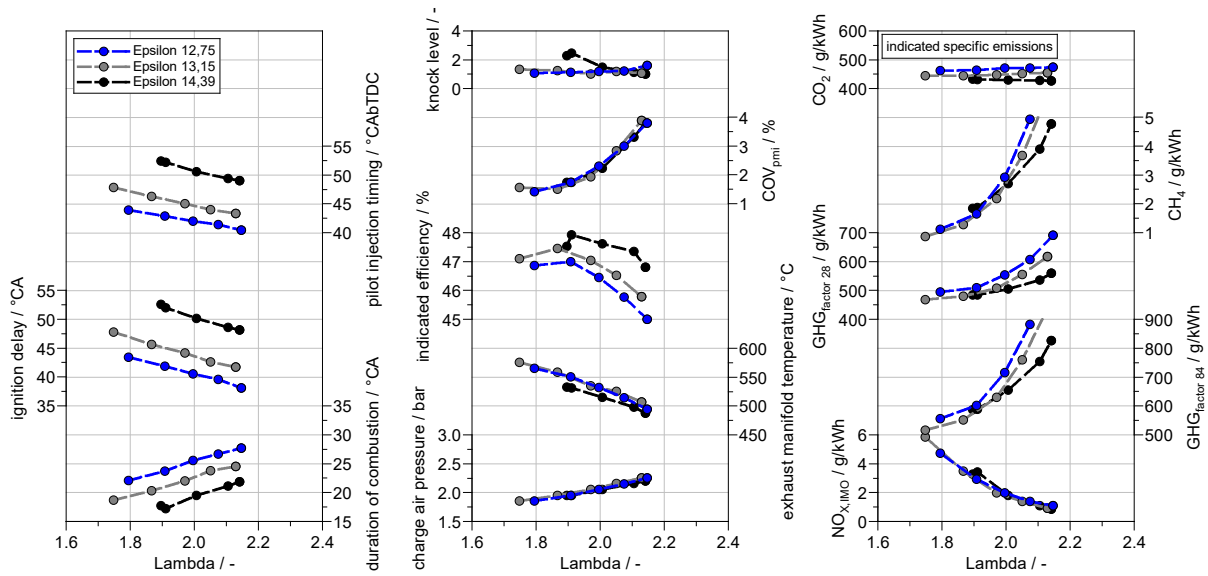


Abbildung 37: Einfluss des Verdichtungsverhältnisses basierend auf Variationen des Luftverhältnisses bei 50 % Last

Da das Klopfen in den niedrigen Lastpunkten keine extrem kritische Herausforderung darstellte, wurden weitere Versuche bei 75 % Last durchgeführt und zwei Szenarios aufgestellt. Ein großer Epsilon-Sprung (12,75→14,39) in einem kleinen Lastbereich (25-50 % Last) oder eine kleinere Anhebung des Verdichtungsverhältnisses (12,75→13,15) in einem größeren Lastbereich (25-75 % Last). Durch die hohe Gewichtung des 75 % Lastpunkts im E2-Zyklus für Motoren mit Festdrehzahl bietet Szenario 2 insgesamt Wirkungsgradvorteile trotz nicht ausgeschöpften Potenzials bei den Niedriglastpunkten (Tabelle 6). Die Ergebnisse zeigen auch, dass sich mit einem vollvariablen/stufenlosen VCR-System theoretisch die größten Wirkungsgradvorteile erzielen ließen. Der gegenüber einem zweistufigen VCR System zusätzlich benötigte Entwicklungsaufwand müsste jedoch in Relation gesetzt werden.

Tabelle 6: Kraftstoffverbrauch bei zwei verschiedenen Anwendungsszenarien eines variablen Verdichtungsverhältnisses

Lastpunkt	E2-Faktor	Szenario 1 12,75→14,39	Szenario 2 12,75→13,15	Szenario 3 stufenloses VCR
100 %	0,20			
75 %	0,50		-1,0 %	-1,0 %
50 %	0,15	-2,0 %	-1,0 %	-2,0 %
25 %	0,15	-2,0 %	-1,0 %	-3,0 %
E2-Zyklus	1,00	-0,6 %	-0,8 %	-1,3 %

2.1.7 AP 5.2: Technologiepakete zur nachmotorischen Methanreduktion

Im Rahmen der abgeschlossenen Arbeiten wurden umfassende Umbau- und Erweiterungsmaßnahmen am bestehenden Abgassystem durchgeführt. Zentrale Maßnahme war die Errichtung einer neuen Bypassstrecke in der Abgasführung mit Nennweite DN50. In dieser Strecke wurde eine Katalysator-Einhausung installiert, die die Möglichkeit bietet, bis zu zwei Katalysatorbricks in Reihe zu schalten. Durch diese modulare Ausführung lässt sich die Raumgeschwindigkeit flexibel anpassen, sodass unterschiedliche Betriebsbedingungen und Versuchsszenarien abgebildet werden können. Der Abgasmassenstrom in der Bypassstrecke ist über elektrisch angesteuerte Abgasventile regelbar und über eine Messblende messbar, wodurch die durch den Bypass geführte Abgasmenge und damit die Raumgeschwindigkeit am jeweiligen Versuchskatalysator variabel eingestellt werden kann. Nach der Passage durch die Bypassstrecke wird das Abgas wieder in die Hauptabgasleitung zurückgeführt. Auf diese Weise wird lediglich ein definierter Abgasmassenstrom entnommen, ohne den Gesamtprozess zu beeinträchtigen. Der Abgasstrang inkl. neuer Bypassstrecke ist Abbildung 38 dargestellt.

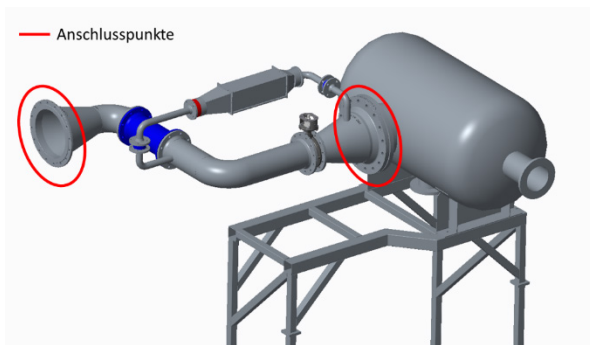


Abbildung 38: Installierte Abgasstrecke mit Isolierung

Im Zuge der Neuinstallation wurde außerdem eine Abgas-Wechseinrichtung realisiert, die es ermöglicht, Abgasproben an unterschiedlichen Positionen des Systems zu entnehmen. Während bisher das Abgas standardmäßig nach dem Motor in die Abgasmessanlage FTIR i60 geleitet wurde, besteht nun zusätzlich die Möglichkeit, automatisiert auf die Entnahmestellen vor sowie nach dem Katalysator umzuschalten. Zudem wurde die bestehende i60-Abgasanlage gezielt erweitert. Die Abgasposition nach dem Katalysator wurde nun fest verrohrt mit der zweiten Linie der Abgasmessanlage, sodass Simultanmessungen, beispielsweise vor und nach dem Katalysator zur Analyse der Methanreduktion (CH_4), oder aber Vergleichsmessungen der beiden Linien möglich sind. Die Abgasentnahmestation ist in Abbildung 39 dargestellt.



Abbildung 39: Abgas-Wechseinrichtung zur Abgasentnahme an verschiedenen Entnahmestellen

Darüber hinaus wurde die gesamte Strecke zur Katalysatorerprobung messtechnisch vollständig erschlossen, sodass eine präzise Erfassung aller relevanten Parameter gewährleistet ist. Das Schaltbild der final installierten Abgasmessstrecke inkl. der Katalysator-Einhausung ist in Abbildung 40 dargestellt.

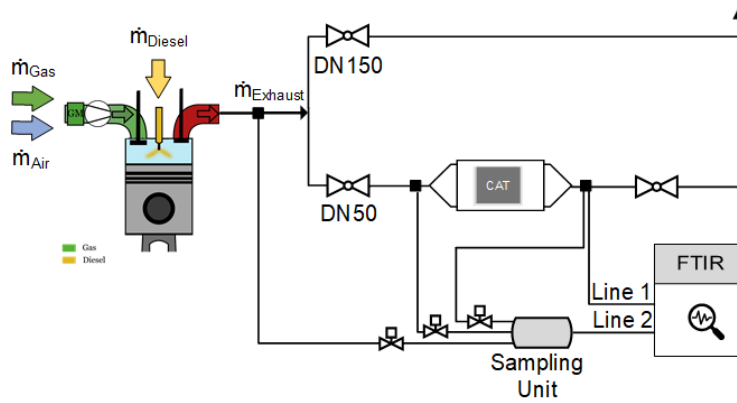


Abbildung 40: Schaltbild der installierten Abgasstrecke inkl. der Abgasmessung

In der Literatur wird die rasche Alterung von Katalysatoren mit einer Pd/Al₂O₃ Beschichtung besonders bei mit Wasser beladenem Abgas beschrieben, sodass für die Inbetriebnahme zunächst ein unbeschichteter Katalysator eingesetzt wurde, um die Funktion der Anlage sowie die möglichen Messparameter zu prüfen. Nach erfolgreicher Erprobung konnte anschließend der mit Palladium beschichtete Katalysator eingebaut und getestet werden. Die zu untersuchenden Variationen werden in Tabelle 7 dargestellt. Die Prüfstandsversuche zum Katalysator-Umsetzungsgrad wurden unterstützt durch Synthesegas-Versuche des FVTR GmbH.

Tabelle 7: Variationsparameter der Katalysator-Erprobungen

Nr.	Variation	Untersuchung
1	Temperatur	Light-Off Temperatur
2	Schwerpunkt	Temperatur
3	Lambda	Wassergehalt
4	Bypass-Druck	Strömungsgeschwindigkeit
5	Massenstrom	Raumgeschwindigkeit

Die Aufheizcharakteristik des eingesetzten Methanoxidationskatalysators ist in Abbildung 41 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die sogenannte Light-off-Temperatur, also die Temperatur, bei der eine Methan-Konvertierungsrate von 50 % erreicht wird, bei etwa 400 °C liegt. Diese Temperaturmarke ist für Katalysatoren von großer Bedeutung, da sie den Punkt kennzeichnet, ab dem die katalytische Oxidationsreaktion effizient einsetzt. Bei weiterem Temperaturanstieg erhöht sich die Aktivität deutlich: Bei einer maximal erreichten Abgastemperatur von rund 490 °C konnte eine Konvertierungsrate von nahezu 90 % gemessen werden. Dies verdeutlicht das grundsätzliche Potenzial des Katalysators, Methanemissionen in erheblichem Maße zu reduzieren, sobald die für die Reaktion notwendigen thermischen Bedingungen vorliegen.

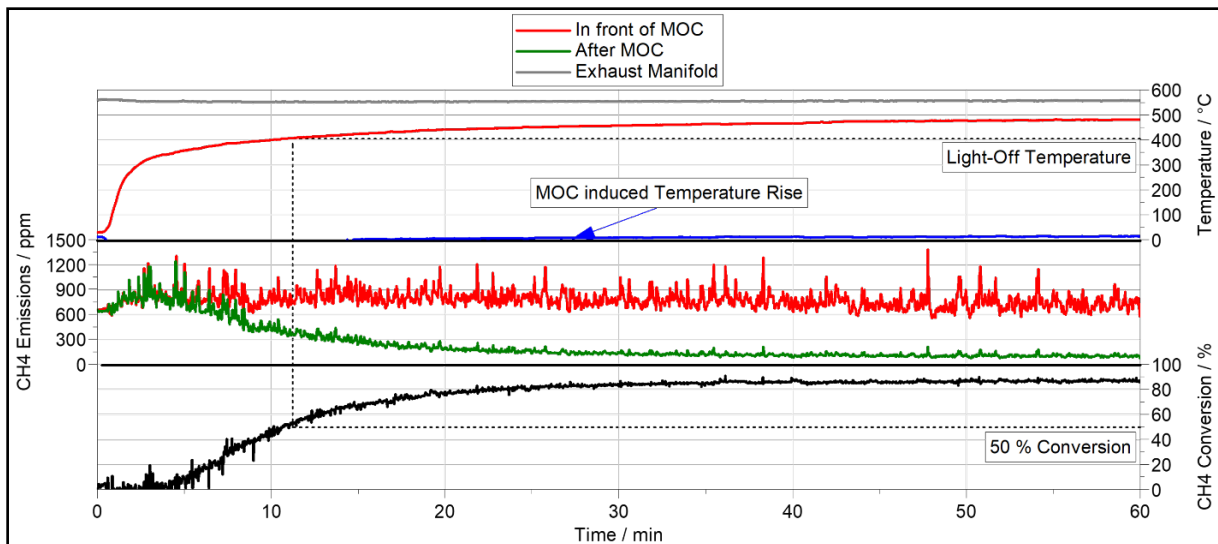


Abbildung 41: Bestimmung der Light-Off Temperatur

Im Rahmen der Katalysator-Messkampagne wurden verschiedene Einflussgrößen systematisch untersucht, um das Verhalten und die Wirkmechanismen besser zu verstehen. Hierbei konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

Zunächst wurde die Wirkung einer Lambda-Variation betrachtet. Unter Lambda versteht man das stöchiometrische Luft-Kraftstoff-Verhältnis. Eine gezielte Anpassung dieses Verhältnisses sollte den Wasseranteil im Abgas erhöhen und somit potenziell einen Einfluss auf die Katalysatorleistung haben. In den Versuchen zeigte sich jedoch, dass diese Maßnahme keinen kurzfristig signifikanten Effekt auf die Methan-Konvertierungsrate hatte. Dies lässt sich damit erklären, dass der Katalysator in erster Linie temperaturabhängig arbeitet und die kurzfristige Veränderung der Abgaszusammensetzung nicht den dominierenden Einfluss darstellt. Zudem tritt der Effekt der Inhibition durch gasförmiges Wasser im Abgas bereits bei sehr kleinen Wasseranteilen auf und nimmt dann bei steigenden Wasseranteilen nur noch geringfügig zu. Vollständig wasserfreies Abgas lässt sich am Motor jedoch nicht einstellen.

Ein weiterer untersuchter Parameter war der Druck in der Bypass-Strecke. Durch eine gezielte Variation sollte die Strömungsgeschwindigkeit des Abgases verändert werden. Ziel war es, eine mögliche Verbesserung der Umwandlungseffizienz durch verlängerte Verweilzeiten im Katalysator zu erreichen. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass dieser Effekt keinen messbaren Einfluss auf die Konvertierungsrate hatte. Das bedeutet, dass innerhalb der im Versuch abgedeckten Strömungsgeschwindigkeiten die Kontaktzeit zwischen Abgas und Katalysator ausreichend lang ist und damit keine weitere Optimierung in diesem Bereich erzielt werden konnte. Außerdem wird die durch Anhebung des Abgasdrucks (und damit Anhebung der Abgasdichte) erreichte Erhöhung der Verweilzeit des Abgases im Katalysator durch die bei steigenden Drücken sinkenden Diffusionsgeschwindigkeiten wieder kompensiert.

Im Gegensatz dazu konnte ein deutlicher Einfluss durch eine späte Schwerpunktlage der Verbrennung festgestellt werden. Dabei handelt es sich um eine Maßnahme, bei der der Zündzeitpunkt im Motor bewusst nach hinten verlagert wird. Dies führt zu einer Erhöhung der Abgastemperatur, da ein größerer Teil der Wärmefreisetzung in den Expansionstakt verlagert wird. Dies führt zu einer Reduzierung des Wirkungsgrads und entsprechender Erhöhung der Abgastemperatur. Höhere Abgastemperaturen verbessern die Aktivierung des Katalysators und steigern somit direkt die Konvertierungsrate.

Darüber hinaus hatte auch eine Verringerung der normierten Raumgeschwindigkeit einen positiven Einfluss. Die Raumgeschwindigkeit beschreibt das Verhältnis von Abgasvolumenstrom zum Katalysatorvolumen. Eine Reduzierung bedeutet, dass das Abgas länger im Katalysator verweilt, was die Umsetzungswahrscheinlichkeit erhöht. Am realen Motor kann dies durch eine Erhöhung des Katalysatorvolumens erreicht werden.

Neben diesen Parametervariationen wurde auch die Dauerhaltbarkeit des Katalysators untersucht. Dazu wurde die Konvertierungsrate in regelmäßigen Abständen an definierten Referenzpunkten überprüft. Bereits nach einer Betriebsdauer von etwa 33 Stunden zeigte sich ein signifikanter Rückgang der Leistung: Die Methan-Konvertierungsrate sank auf rund 35 %, wie in Abbildung 42 dargestellt. Dieser Befund macht deutlich, dass die

Deaktivierung des Katalysators eine große Herausforderung darstellen. Ein wesentlicher Einflussfaktor hierbei ist der hohe Wassergehalt im Abgas und die damit einhergehende Hydroxylradikale, welche die katalytisch aktiven Zentren in der katalytischen Oberfläche deaktivieren und deren Wirksamkeit reduzieren.

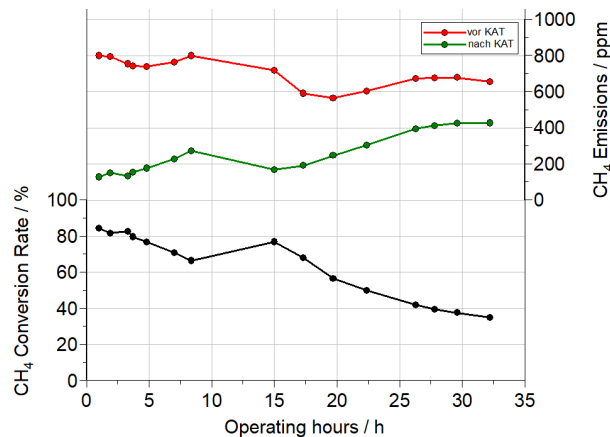


Abbildung 42: Deaktivierung des Katalysators in Abhängigkeit der Zeit

Die Ergebnisse wurden auf der CIMAC-Konferenz 2025 in Zürich vorgestellt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Versuche am Forschungsmotor das große Potenzial zur Treibhausgasreduktion bei Dual-Fuel-Motoren mithilfe eines Methanoxidationskatalysators eindeutig aufgezeigt haben. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Dauerhaltbarkeit eine zentrale Herausforderung bleibt.

2.1.8 AP 5.3: Nutzbarkeit ausgeweiteter variabler Ventilsteuerzeiten zur Verbrennungsführung

Im Rahmen einer Dissertation wurde ein flexibler Ventiltrieb verbaut und untersucht, um die Leistung und das Emissionsverhalten des Prüfstandmotors zu optimieren. Ziel des Aufgabenpaketes sollte es sein, den Einfluss verschiedene Nockenprofile und Verstellwinkel auf die Effizienz und die Emissionen zu untersuchen – insbesondere Stickoxide (NO_x) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (Methanschlupf). Hierzu wurde die Steuerung der Ventilöffnungs- und Schließzeitpunkte flexibel gestaltet, sodass der Motor je nach Betriebszustand optimal eingestellt werden kann.

Für die Versuche wurde der Ventiltrieb des Motors umfassend umgebaut: Statt einer fest ausgelegten Nockenwelle kam eine verbesserte Flexible Camshaft Technology (FCT) zum Einsatz, die durch einen elektrisch verstellbaren Mechanismus eine stufenlose Anpassung der Ventilöffnungszeiten durch Phasenverschiebung ermöglicht. Der Verstellmechanismus basiert auf drei exzentrischen Schleppebeln, die über Exzenter auf einer Schleppebelwelle verbunden sind. Durch die Drehung dieser Welle und damit der Exzenter verändern sich die Einlass- und Auslasssteuerzeiten. Durch die unabhängige Ausführung der Exzenter kann erreicht werden, dass die Einlasssteuerzeiten nach früh und die Auslasssteuerzeiten gleichzeitig entgegengesetzt nach spät verschoben werden bzw. umgekehrt. Für die Studie wurde die bisher hydraulisch zweistufige Verstellung durch einen elektrischen Antrieb mit Schneckengetriebe ersetzt, sodass der Ventilsteuerwinkel kontinuierlich und präzise bei laufendem Motor eingestellt werden kann. Das verbaute FCT-Modul ist auf der linken Seite dargestellt, die mehrteilige Nockenwelle inkl. der Darstellung des Einlass, Auslass und Pumpennocken auf der rechten Seite in Abbildung 43.

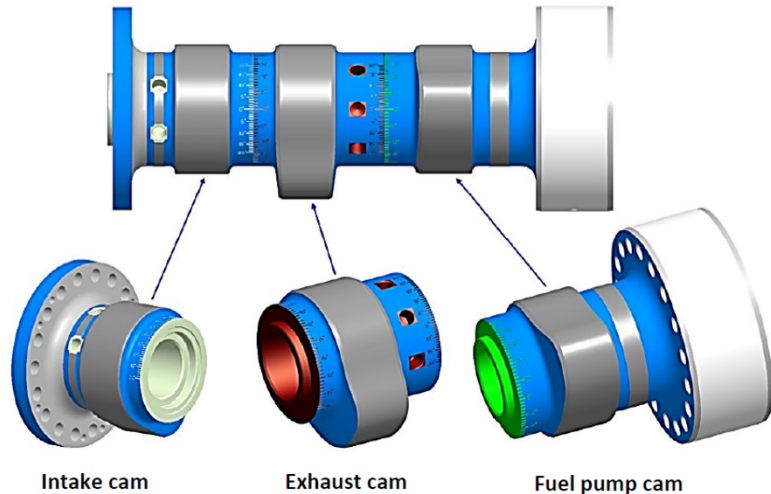
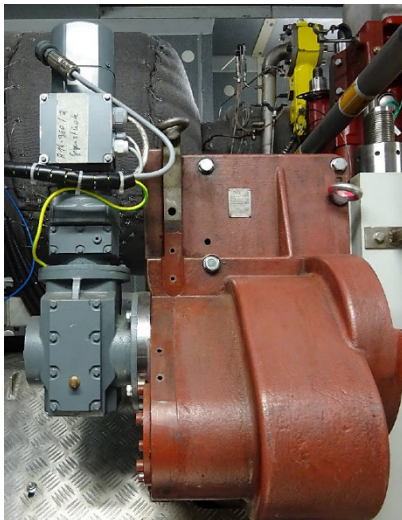


Abbildung 43: Angebaute FCT-Einheit links, Mehrsegment-Nockenwelle rechts

Parallel zu den Umbauten wurde ein Simulationsmodell entwickelt, um die Auswirkungen verschiedener Ventilsteuerungen auf Leistung und Emissionen vorab berechnen zu können. Das Modell umfasste zwei Komponenten: Zum einen ein kinematisches Modell zur Erzeugung der Ventilhubkurven für beliebige Steuerwinkel, zum anderen ein Verbrennungsmodell in AVL CRUISE-M, das auf realen Messdaten des Prüfstands basiert. Damit konnten mögliche Kollisionssituationen zwischen Ventilen und Kolben ausgeschlossen und der Einfluss der Steuerzeiten auf Verbrennungstemperaturen, NO_x-Bildung und Methanschlußpf detailliert untersucht werden. Zudem wurde neben der Standardnockenwelle ein alternatives Nockenprofil simuliert, das eine kürzere Ventilöffnungsdauer und geringere Ventilüberschneidung aufweist. Ziel war es, die Auswirkungen verschiedener Nockencharakteristika auf die Emissions- und Leistungsergebnisse vergleichen zu können. Die Methodik zur Erforschung des Einflusses eines variablen Ventiltriebs bei LNG/Diesel Dual-Fuel Motoren ist in Abbildung 44 dargestellt. Die vorhandenen Nockenprofile wurden gesammelt und die möglichen Nockenpaare erarbeitet. Anschließend wurden diese Nockenpaare gegenübergestellt und mögliche Ventilkollisionen sowie auch die Ventilhubkurven bei Matlab untersucht.

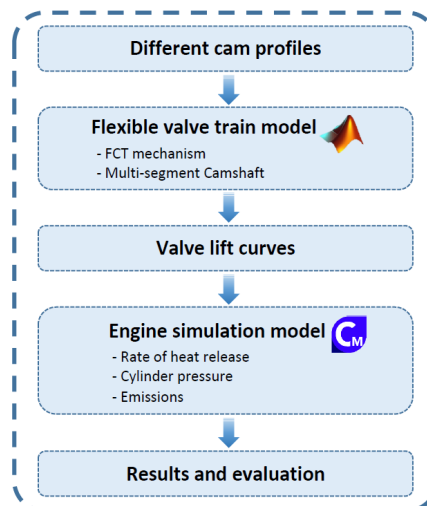


Abbildung 44: Methodik zur simulativen Prüfung der Einflüsse eines variablen Ventiltriebs

Für jedes Nockenwellenpaar wurde hierbei eine Testmatrix erarbeitet, die anschließend bei AVL Cruise M in einer 0D/1D-Simulation auf verschiedene Parameter geprüft wurde. Eine solche Testmatrix für diverse Nockenpaare ist in Abbildung 45 dargestellt. Im AVL CRUISE M Modell wurde der Einfluss verschiedener Ventilsteuerstrategien auf das Verhalten des Dual-Fuel-Motors simuliert. Dabei wurden vor allem der FCT-Verstellwinkel, der Einlassventilschließzeitpunkt (IVC), der Auslassventilschließzeitpunkt (EVC) sowie die Ventilüberschneidung systematisch variiert. Für jede Konfiguration wurden die Auswirkungen auf Zylinderdruck, Temperaturverlauf, indizierten Mitteldruck, Wirkungsgrad, NO_x-Emissionen und Methanschlußpf berechnet. Zudem wurden zwei

unterschiedliche Nockenprofile simuliert, um deren Einfluss auf Leistung und Emissionsverhalten zu vergleichen. Das Modell wurde mit Messdaten vom Prüfstand validiert und diente dazu, ein optimales Betriebsfenster der FCT-Technologie zu identifizieren.

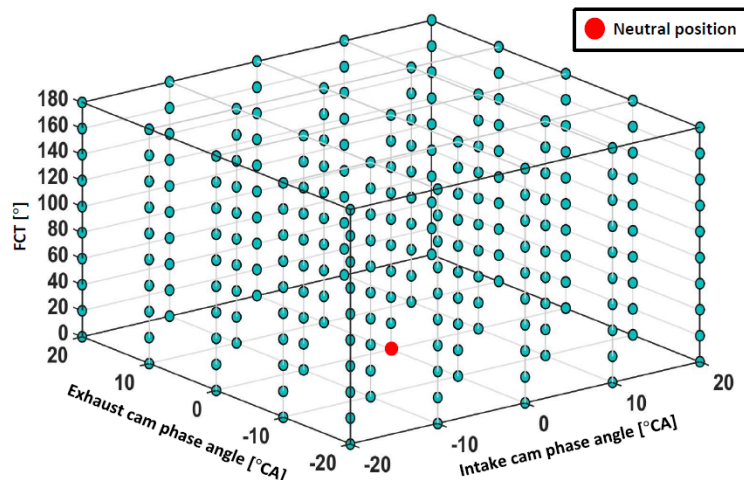


Abbildung 45: Testmatrix für diverse Nockenwellenpaare

Die Ergebnisse der Experimente und Simulationen zeigen, dass die flexible Ventilsteuerung eine deutliche Optimierung der Motorleistung und der Emissionen ermöglicht. Durch ein früheres Schließen des Einlassventils (Miller-Timing) konnten die Spitzendrücke und Temperaturen im Brennraum gesenkt werden, was das Risiko von Klopfen verringerte. Dadurch war es möglich, die Motorlast zu erhöhen: Der indizierte Mitteldruck stieg von etwa 21 bar auf 23 bar, was einer Leistungssteigerung von rund 10 % entspricht. Der Wirkungsgrad sank dabei nur geringfügig, um etwa zwei Prozentpunkte. Allerdings zeigte sich, dass extreme Frühverstellungen nicht durchgehend vorteilhaft sind: Bei sehr großen Verstellwinkeln stiegen die NO_x -Emissionen wieder an, da das verspätete Schließen des Auslassventils zu höheren Restgasanteilen und Abgastemperaturen führte.

Bezüglich des Methanschlupfs ergab sich der erwartete gegensätzliche Trend: Eine starke Verstellung mit größerer Ventilüberschneidung führte zu einem Anstieg der unverbrannten Kohlenwasserstoffe um bis zum Dreifachen. Bei sehr späten Einlassschließungen konnten die Methanemissionen dagegen um etwa 30 % reduziert werden, allerdings stiegen dabei die Temperaturen und die Klopfneigung, was wiederum die NO_x -Bildung fördern kann. Die Studie bestätigt somit, dass ein Trade-off zwischen NO_x -Reduktion, Methanschlupf und Wirkungsgrad besteht.

Das alternative Nockenprofil zeigte sich in der Simulation als vielversprechender Ansatz zur Entschärfung dieser Zielkonflikte. Durch die kürzere Ventilöffnungsdauer und geringere Überschneidung wurden die Methanschlupfwerte bei hohen Verstellwinkeln deutlich reduziert, während gleichzeitig die NO_x -Bildung weniger stark anstieg. Besonders in Kombination mit moderaten Verstellwinkeln konnte so ein optimales Betriebsfenster identifiziert werden: In einem FCT-Winkelbereich von 80° bis 120° lassen sich sowohl NO_x -Emissionen deutlich senken als auch der Methanschlupf auf moderatem Niveau halten. Dies eröffnet die Möglichkeit, den Motor dynamisch an unterschiedliche Betriebsbedingungen anzupassen – etwa mit NO_x -minimierten Einstellungen im Hafenbetrieb und effizienteren Konfigurationen bei Vollast auf See.

Die Studie zeigt, dass durch die flexible Ventilsteuerung eine signifikante Verbesserung von Effizienz und Emissionsverhalten erreicht werden kann. Die Kombination aus experimenteller Untersuchung, Simulationsmodell und dem Test alternativer Nockenprofile liefert eine solide Basis für die Entwicklung zukünftiger Dual-Fuel-Motoren mit adaptiver Ventilsteuerung. Die Technologie bietet großes Potenzial, um lastabhängig den Miller-Prozess unterschiedlich intensiv anzuwenden und somit Emissionen zu senken bzw. die Effizienz zu erhöhen.

2.1.9 AP 5.4: Potenzialabschätzung AGR-Einsatz bei DF-Brennverfahren

Zu Beginn der Arbeiten zur Potenzialabschätzung eines AGR-Einsatzes bei DF-Brennverfahren wurden Anforderungen an die AGR-Strecke abgeleitet, die in Tabelle 8 dargestellt sind. Zu den funktionalen Anforderungen zählen die technische Realisierung einer AGR-Rate von mindestens 30 %, die notwendige Druckerhöhung aufgrund des Spülgefälles um mindestens 1 bar, die Absenkung der Abgastemperatur auf unter 45°C sowie die

flexible Regelung der AGR-Rate. Diese Punkte beschreiben die grundlegende Funktionsfähigkeit der Abgasrückführung und stellen sicher, dass die Prozesskette stabil und kontrollierbar abläuft.

Tabella 8: Anforderungen an die zu errichtende AGR-Strecke

Nr.	Anforderung
1	Realisierung einer AGR-Rate von min. 30 % bei Vollast
2	Druckerhöhung von mindestens einem bar
3	Verminderung der Temperatur auf mindestens 45 °C
4	Flexible Regelung der AGR-Rate
5	Zuverlässigkeit
6	Korrosionsbeständigkeit
7	Geringer Stromverbrauch
8	Kompakte Bauweise
9	Geringes Gewicht
10	Niedrige Anschaffungskosten sowie laufende Kosten
11	Wartungsarm & -freundlich

Die nichtfunktionalen Anforderungen betreffen insbesondere Aspekte wie Zuverlässigkeit, Korrosionsbeständigkeit, geringen Stromverbrauch, kompakte Bauweise, geringes Gewicht sowie niedrige Anschaffungskosten und laufende Kosten. Hinzu kommen Kriterien wie Wartungsarmut und -freundlichkeit. Diese Anforderungen sichern die langfristige Einsetzbarkeit, die Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit der gesamten Anlage.

Nachdem die entsprechenden Berechnungen über mögliche AGR-Raten sowie die Messung des nutzbaren Kühlwassermassenstroms abgeschlossen wurden, konnte die AGR-Strecke inklusive aller notwendigen Erweiterungen am Prüfstand projiziert werden. Als Grundlage hierfür diente ein RI-Fließschema, das in Abbildung 46 dargestellt ist. Das Abgas wird dabei über einen Anschluss an der Abgastonne entnommen und über ein elektrisch angetriebenes Regelventil dosiert. Die schwingungstechnische Entkopplung erfolgt durch einen Abgaskompensator. Anschließend wird das Abgas mittels eines Wärmeübertragers gekühlt, bevor es aufgrund des positiven Spülgefälles von Großmotoren wieder aktiv zur Förderung verdichtet werden muss. Ein zweiter Wärmeübertrager reduziert die Verdichtungsendtemperatur auf ein Niveau unterhalb der Ladeluft. Über einen Zugang vor der Ladelufttonne wird das Abgas schließlich wieder zudosiert und über ein Coriolis-Messsystem mengenmäßig erfasst. Die Messungen des vorhandenen Kühlwassermassenstroms haben gezeigt, dass eine zusätzliche Kühlwasserstrecke für die Rückkühlung der AGR-Strecke erforderlich ist. Die notwendigen Anschlusspunkte befinden sich prüfstandsnah und konnten ohne größere Anpassungen berücksichtigt werden. Die im Fließschema dargestellten Bauteile wurden für eine maximale AGR-Rate von 30 % bei Vollast ausgelegt und bei den diversen Lieferanten angefragt. Nach sorgfältiger Auswahl der für das Vorhaben geeignetsten Komponenten erfolgte die Bestellung im vierten Quartal 2023. Der Einbau wurde planmäßig zu Beginn des zweiten Quartals 2024 umgesetzt.

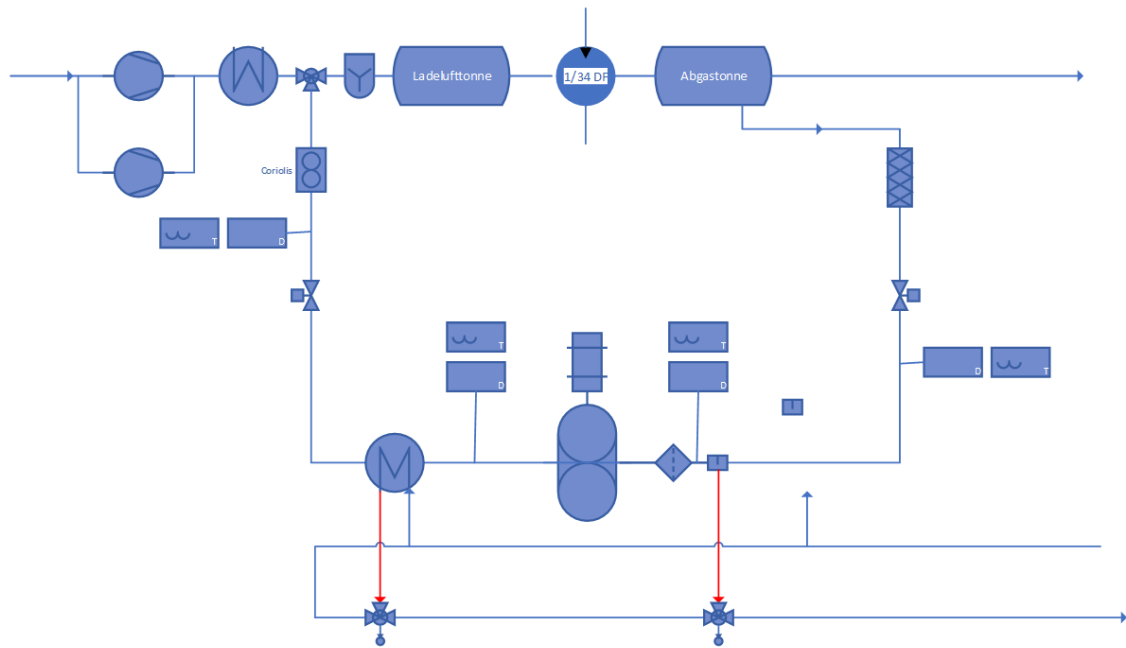


Abbildung 46: RI-Fließschema der AGR-Strecke inklusive Sensorik

Parallel zu den Angebotsanfragen wurden die STP-Dateien der Bauteile in das vorhandene CAD-Modell des Prüfstands integriert, um die Einbausituation frühzeitig zu überprüfen und eine konsistente Planung zu gewährleisten. Folglich wurde die AGR-Strecke am Prüfstand aufgebaut und verrohrt. Die aufgebaute und isolierte AGR-Strecke ist in Abbildung 47 dargestellt. Auf der linken Seite ist vom Abgas-Flexschlauch ausgehend die feste Gasverrohrung zum ersten Wärmeübertrager zu sehen. Zur besseren Übersicht ist auf der linken Seite die Verrohrung noch nicht angebracht. Diese verläuft vom 1. Wärmeübertrager ausgehend über einen Kondensatabscheider zum gelben Roots-Gebläse, das auf einem eigens konstruierten Block mit dem Elektromotor steht und via Zahnriemen verbunden und übersetzt ist. Anschließend wird das Abgas in einen zweiten Wärmeübertrager geleitet, der das komprimierte und erhitzte Abgas wieder abkühlt. Zusätzlich sind auch die verpressten Wasserleitungen zu sehen für den eigenen AGR-Kühlkreislauf. Auf der rechten Seite ist die aufgebaute und isolierte AGR-Strecke zu sehen. Die AGR-Strecke ist bis zum 1. Wärmeübertrager mit hitzebeständigen Glasgewebematten ausgestattet. Anschließend sind alukaschierte Lamellenmatten verbaut, die bis 250 °C hitzebeständig sind. Die AGR Strecke befindet sich unterhalb des Prüfstandbodens, welcher aus entnehmbare Aluplatten besteht.



Abbildung 47: AGR-Strecke ohne Verrohrung der Gasleitungen (links) sowie mit Verrohrung und Isolierung (rechts)

Eine Abgasrückführung in Verbrennungsmotoren bewirkt generell eine Absenkung der Frischluftmasse bei unveränderter Ladungsmasse. Die dadurch herbeigeführte Absenkung des O_2 -Partialdruckes erhöht die in der Reaktionszone erfasste inerte Gasmasse, reduziert die Flammgeschwindigkeit, verlängert die Brenndauer und bewirkt dadurch geringere Spitzentemperaturen und -drücke. Das rückgeführte Abgas enthält deutlich mehr inerte Bestandteile und weniger Sauerstoff, nimmt also in geringerem Maße an der Verbrennung teil. Neben dem Inertgaseffekt wird die thermische Drosselung auch durch die Änderung der kalorischen Stoffgrößen erreicht. Durch die geringeren Spitzentemperaturen im Zylinder werden die Stickoxid-Emissionen verringert, die besonders im Fokus der IMO TIER III Emissionsrichtlinien stehen.

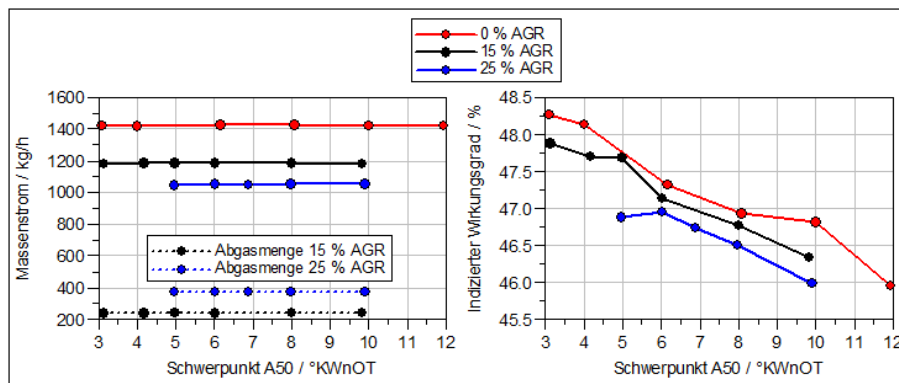


Abbildung 48: Auswirkungen einer AGR-Rate von 15 % bzw. 25 % auf die Luftmassenströme und den Wirkungsgrad

Abbildung 48 zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher AGR-Raten auf den Massenstrom sowie den indizierten Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Schwerpunkt A50. Im linken Diagramm ist der Massenstrom in kg/h über dem Schwerpunkt A50 in °KWnOT aufgetragen. Es ist erkennbar, dass der Massenstrom mit zunehmendem AGR-Anteil abnimmt. Bei 0 % AGR (rote Kurve) liegt der Massenstrom konstant bei etwa 1450 kg/h. Mit 15 % AGR (schwarze Kurve) sinkt dieser Wert auf ca. 1200 kg/h, während er bei 25 % AGR (blaue Kurve) auf rund 1050 kg/h zurückgeht. Zusätzlich sind die Abgasmengen für 15 % und 25 % AGR gestrichelt dargestellt, die proportional zu den eingesetzten AGR-Raten steigen. Das rechte Diagramm zeigt den indizierten Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Verbrennungsschwerpunkt A50. Es ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad mit zunehmendem AGR-Anteil abnimmt. Bei 0 % AGR wird der höchste Wirkungsgrad erreicht (bis zu 48,3 % bei $A50 \approx 3 \text{ °KWnOT}$). Mit steigender AGR-Rate verringert sich der maximale Wirkungsgrad: bei 15 % AGR auf ca. 47,9 % und bei 25 % AGR auf etwa 47,0 %. Zudem sinkt der Wirkungsgrad bei allen AGR-Raten mit zunehmender Verzögerung des Schwerpunktes A50 kontinuierlich. Die beschriebene thermische Drosselung bewirkt eine Reduktion des thermischen Wirkungsgrades, der sich auf der rechten Seite in Abbildung 48 durch die Reduktion des indizierten Wirkungsgrades bemerkbar macht. Eine Anhebung der AGR-Rate bewirkt eine Verschlechterung des Wirkungsgrades. Diese Verschlechterung muss bei der Bewertung der Emissionsvorteile mitberücksichtigt werden.

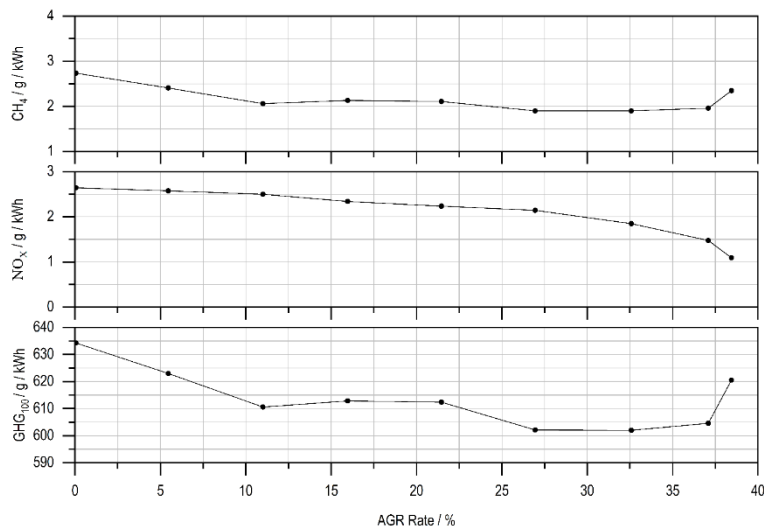


Abbildung 49: Auswirkungen der AGR-Rate auf die Emissionen im ND-Brennverfahren bei 50 % Motorlast

Abbildung 49 zeigt die Auswirkungen einer Variation der AGR-Rate von 0 % bis 35 % auf die spezifischen Emissionen von NO_x und CH₄ sowie die auf 100 Jahre berechneten GHG-Emissionen. Im oberen Diagramm ist die Entwicklung der Methanemissionen in Abhängigkeit von der AGR-Rate dargestellt. Mit zunehmender AGR-Rate sinken die CH₄-Emissionen zunächst von etwa 2,7 g/kWh bei 0 % AGR auf rund 1,8 g/kWh bei ca. 25–30 % AGR. Das mittlere Diagramm zeigt die NO_x-Emissionen. Diese nehmen über den gesamten Bereich mit steigender AGR-Rate kontinuierlich ab – von etwa 2,8 g/kWh bei 0 % AGR bis auf ca. 1,8 g/kWh bei 38 % AGR. Im unteren Diagramm ist der spezifische Treibhausgasausstoß GHG₁₀₀ dargestellt, der die Treibhauswirksamkeit verschiedener Gase (inkl. Methan) berücksichtigt. Hier zeigt sich zunächst ein Abfall von etwa 635 g/kWh bei 0 % AGR auf einen Minimalwert von rund 605 g/kWh bei ca. 30 % AGR. Bei höheren AGR-Raten steigt der Wert jedoch wieder leicht an, was durch die Zunahme unverbrannter Kohlenwasserstoffe (insbesondere Methan) erklärt werden kann.

Es ist zu erkennen, dass die spezifischen NO_x-Emissionen durch die thermische Drosselung in jedem Messpunkt verringert werden. Dieser Trend ist über das gesamte Leistungsspektrum der AGR erkennbar. Auffällig ist zusätzlich der positive Trend der CH₄-Emissionen. Bei geringeren AGR-Raten ist der Einfluss auf den Durchbrand der CH₄-Emissionen gut zu erkennen, bei AGR-Raten unter 10 % liegt die höchste Verringerung der spezifischen Emissionen vor. Anschließend liegen die Emissionen nahezu konstant bei Werten um die 2 g/kWh, bevor Sie bei hohen AGR-Raten über 30 % wieder ansteigen.

Abbildung 50 zeigt den Einfluss der Abgasrückführungsrate (AGR) auf verschiedene motorische Kenngrößen. Die untersuchten Parameter umfassen den Sauerstoffgehalt im Abgas, das Kraftstoff-Luft Verhältnis Lambda, die Verbrennungsstabilität (COV_{pmi}) sowie den indizierten Wirkungsgrad (η_i). Die Ergebnisse zeigen, dass die AGR-Rate einen signifikanten Einfluss auf die Verbrennungsbedingungen und den thermodynamischen Prozessverlauf hat. Mit zunehmender AGR-Rate sinkt der Sauerstoffgehalt im Abgas deutlich. Während bei einer AGR-Rate von 0 % noch etwa 11 Vol.% Sauerstoff gemessen werden, reduziert sich dieser Wert bei 40 % AGR auf ca. 4 Vol.%. Diese Entwicklung ist darauf zurückzuführen, dass durch die Rückführung von Abgasen weniger Frischluft zugeführt wird und somit der verfügbare Sauerstoffanteil für die Verbrennung abnimmt. Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich beim Lambda-Wert, der von ca. 1,9 auf 1,2 abfällt. Dies verdeutlicht, dass das Gemisch mit steigender AGR-Rate sukzessive fetter wird. Ursache hierfür ist der verringerte Sauerstoffanteil in der zugeführten Ladung, wodurch weniger Luft für die vollständige Verbrennung des eingespritzten Kraftstoffs zur Verfügung steht. Die Verbrennungsstabilität (COV_{pmi}) bleibt bis zu einer AGR-Rate von etwa 30 % weitgehend konstant bei rund 2 %. Ab höheren AGR-Raten (> 35 %) steigt der (COV_{pmi}) jedoch deutlich auf bis zu 2,8 % an. Dies deutet auf eine zunehmende Instabilität des Verbrennungsprozesses hin, die durch unzureichende Sauerstoffversorgung sowie erhöhte Restgasanteile verursacht wird. Der indizierte Wirkungsgrad η_i bleibt bis zu einer AGR-Rate von etwa 20 % relativ stabil bei rund 47 %. Bei höheren AGR-Raten zeigt sich jedoch ein sukzessiver Rückgang, wobei der Wirkungsgrad bei ca. 35 % AGR ein Minimum von etwa 45,2 % erreicht.

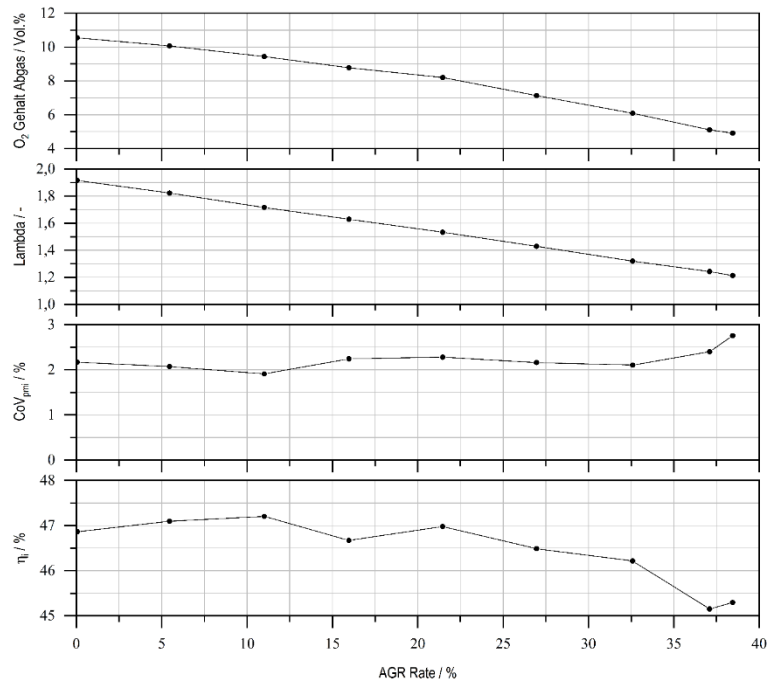


Abbildung 50: Änderung des O₂-Gehalts im Abgas, von Lambda, dem Variationskoeffizienten des Mitteldrucks sowie des Wirkungsgrades bei steigender AGR-Rate

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass niedrige bis moderate AGR-Raten (0 %–20 %) nur geringe Auswirkungen auf die Verbrennungsstabilität und den Wirkungsgrad haben, während hohe AGR-Raten (> 25 %) zu einer deutlichen Verschlechterung der Verbrennungsqualität und der thermischen Effizienz führen. Für den betrachteten Motorbetrieb liegt der optimale AGR-Bereich somit vermutlich im Intervall von 10 % bis 20 %, da hier ein ausgewogenes Verhältnis zwischen NO_x-Reduktion, Verbrennungsstabilität und Wirkungsgrad erreicht wird.

In Abbildung 51 ist der NO_x-CH₄ Trade-Off bei den AGR-Raten 0 %, 5 %, 15 % und 25 % bei verschiedenen Kraftstoff-Luft Verhältnissen zu sehen. Auf der Ordinate sind dabei die spezifischen CH₄-Emissionen, auf der Abszisse die spezifischen NO_x-Emissionen in g/kWh aufgetragen. Die bekannten NO_x-Verringerungsmaßnahmen sind auch in dieser Abbildung zu erkennen. Auffällig ist allerdings, dass auch die CH₄-Emissionen sinken, wodurch die HD-AGR ein probates Mittel darstellt, um auch klimaschädliche CH₄-Emissionen zu verringern.

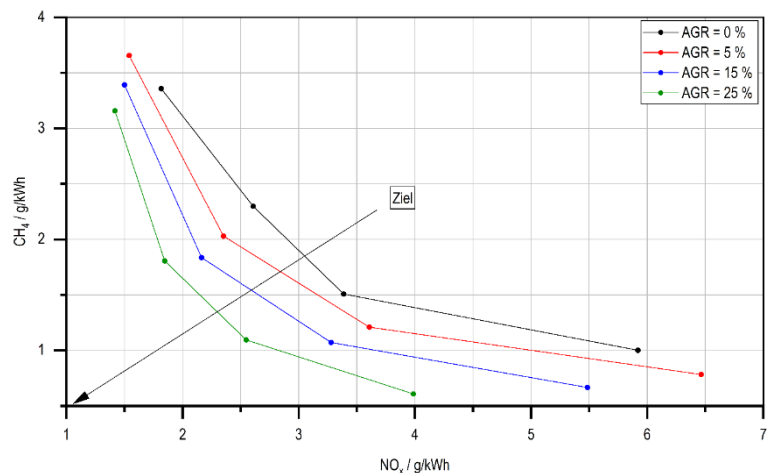


Abbildung 51: CH₄-NO_x Trade-Off bei verschiedenen Kraftstoff-Luftverhältnissen und AGR-Raten

Auf der ICE Konferenz 2025 (17th International Conference on Engines & Vehicles for Sustainable Transport) auf Capri wurden Ergebnisse hinsichtlich des Einsatzes eines AGR-Systems bei LNG/Diesel Dual-Fuel Motoren gezeigt und die Emissionswerte verglichen.

Im Rahmen des TEME2030+-Projektes wurde die Effizienz von AGR für das Mitteldruck-Schichtladungs-Brennverfahren untersucht, bei dem im Vergleich zum Niederdruck-Brennverfahren ein höherer Ladeluftdruck für

eine bessere Verbrennung benötigt wird. Durch den erhöhten Ladeluftdruck gelangt mehr Sauerstoff in die Kolbenmulde, was die Verbrennungscharakteristik und die resultierenden Emissionen maßgeblich beeinflusst. In Abbildung 52 ist der Einfluss der AGR für verschiedene AGR-Raten und unterschiedliche Ladeluftdrücke auf das Mitteldruck-Schichtladungs-Brennverfahren dargestellt. Das obere Diagramm zeigt die spezifischen CH₄-Emissionen in g/kWh. Es ist zu erkennen, dass die Methanemissionen mit steigendem Ladeluftdruck für alle AGR-Raten leicht ansteigen aber auch hier die HD-AGR einen positiven Einfluss auf den Methan-Schlupf hat. Bei einer AGR-Rate von 0 % treten die höchsten CH₄-Emissionen auf.

Im mittleren Diagramm sind die spezifischen NO_x-Emissionen in g/kWh dargestellt. Hier zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit vom Ladeluftdruck: Mit steigendem Ladedruck steigen hier die NO_x-Werte, insbesondere bei niedrigen AGR-Raten, was auf einen besseren Durchbrand und eine heißere Verbrennung hindeutet. Eine Erhöhung der AGR-Rate reduziert hingegen die NO_x-Emissionen deutlich, da durch den höheren Anteil an inerten Gasen weniger Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht.

Das untere Diagramm zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen bezogen auf einen Horizont von 100 Jahren in g/kWh. Hier ist zu erkennen, dass bei 0 % AGR die Emissionen mit steigendem Ladeluftdruck leicht zunehmen. Bei höheren AGR-Raten (15 % und 25 %) bleiben die GHG-Werte hingegen nahezu konstant oder sinken leicht.

Zusammenfassend können hier die Einflüsse des Brennverfahrens sowie der Einfluss einer AGR gezeigt werden. Durch eine gezielte Variation der AGR-Raten lassen sich diese Emissionen gezielt beeinflussen, um im Mitteldruck-Brennverfahren geringe Schadstoffe zu erreichen sowie den Ausstoß klimaschädlicher Gase zu verringern.

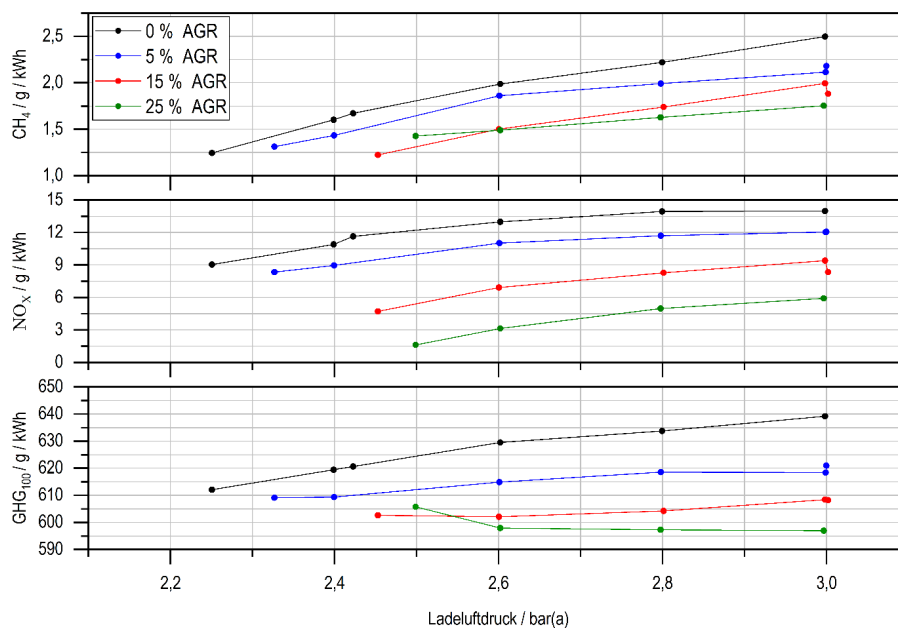


Abbildung 52: Emissionen bei unterschiedlichen Ladeluftdrücken und AGR-Raten

In Abbildung 53 sind die Ergebnisse eines AGR-Einsatzes im Mitteldruck-Brennverfahren in Abhängigkeit vom Verbrennungsschwerpunkt (MFB50) dargestellt. Der Verbrennungsschwerpunkt beschreibt den Kurbelwinkel, bei dem 50 % der Kraftstoffenergie umgesetzt wurden, und hat einen entscheidenden Einfluss auf die Emissionscharakteristik des Motors. Allgemein zeigt sich ein klarer NO_x/CH₄-Trade-off: Ein früher Verbrennungsschwerpunkt (niedriger MFB50-Wert) führt zu einer schnelleren und heißeren Verbrennung, was mit höheren NO_x-Emissionen einhergeht, während die CH₄-Emissionen gleichzeitig niedrig bleiben. Wird der Verbrennungsschwerpunkt hingegen nach hinten verschoben (höherer MFB50-Wert), sinken die NO_x-Emissionen deutlich, da die Brennraumtemperaturen abnehmen. Allerdings steigen dadurch die CH₄-Emissionen erheblich an, da die kühlere und weniger vollständige Verbrennung die Oxidation des Methans reduziert.

Die Auswirkung der AGR-Rate (Abgasrückführung) ist in den Diagrammen ebenfalls gut zu erkennen. Eine Erhöhung der AGR führt zu einer signifikanten Reduktion der NO_x-Emissionen, da weniger Sauerstoff im Brennraum verfügbar ist und die Verbrennungstemperaturen sinken. Gleichzeitig führt eine höhere AGR-Rate ebenfalls zu verringerten CH₄-Emissionen. Beim Blick auf die Treibhausgasemissionen (GHG₁₀₀) im unteren

Diagramm ist zu erkennen, dass diese mit zunehmender Verzögerung des Verbrennungsschwerpunktes insgesamt ansteigen. Der Effekt ist bei niedriger AGR am stärksten ausgeprägt, während bei höheren AGR-Raten ein deutlich flacherer Anstieg sichtbar wird. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Verbrennungsschwerpunkt einen entscheidenden Einfluss auf das Emissionsverhalten hat. Ein früher Schwerpunkt begünstigt niedrige CH₄-Emissionen, verursacht jedoch hohe NO_x-Werte, während ein später Schwerpunkt die NO_x-Bildung reduziert, aber zu einem Anstieg der CH₄-Emissionen führt. In Kombination mit einer gezielten Anpassung der AGR-Rate kann ein optimaler Kompromiss zwischen niedrigen NO_x- und CH₄-Emissionen erreicht werden.

Der Einsatz einer AGR bietet demnach die Möglichkeit, den Motor in neuen Bereichen zu betreiben, die vorher aufgrund von Emissionsrestriktionen nicht möglich waren und stellt damit eine Möglichkeit dar, die Schifffahrt zukünftig klimafreundlicher zu gestalten.

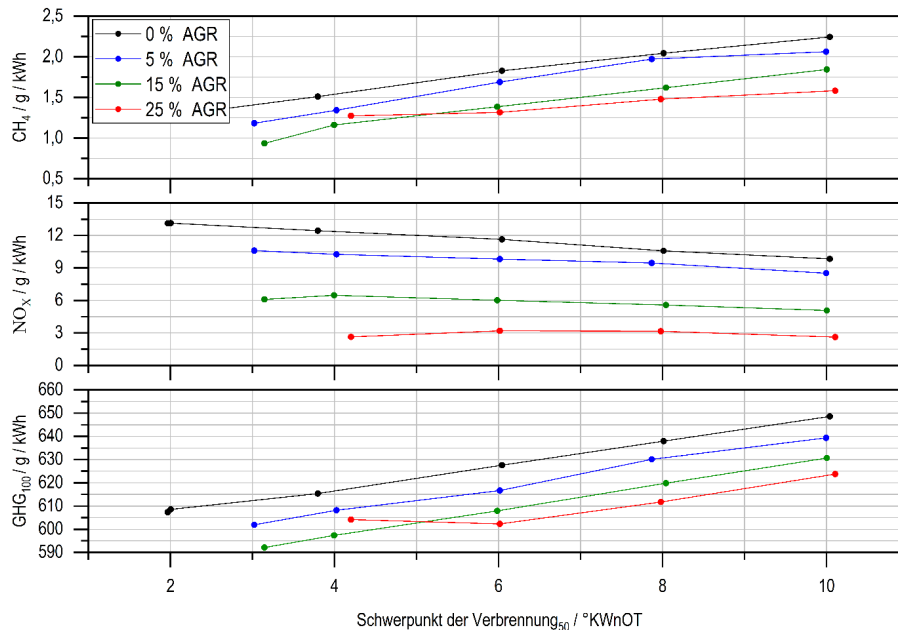


Abbildung 53: Emissionen in Abhängigkeit des Verbrennungsschwerpunktes und verschiedenen AGR-Raten

2.1.10 AP 5.5: Untersuchung von Optimierungsmaßnahmen des Kolben-Ring-Buchse-Pakets

Vor diesen Versuchsreihen wurde eine neue Laufbuchse mit Temperaturmessstellen an verschiedenen Positionen in Zusammenarbeit mit dem assoziierten Partner M. Jürgensen gefertigt. Die Auswertung der Prüfstandsmessgrößen zur Einordnung der Betriebszustände erfolgte durch den LKV. Nachfolgend ist eine beispielhafte Auswertung der Laufbuchsentemperaturen dargestellt. Es konnten hierdurch Einblicke in die Thermodynamik des Wärmeübergangs in die Laufbuchsenwand gewonnen werden. Sie gibt darüber hinaus Aufschluss über die Unterschiede zwischen dem Betrieb mit Erdgas und Betrieb mit Wasserstoffzumischung. Diese Messungen unterstützen auch die Simulationsarbeiten, indem gute Randbedingungen für die 3D-CFD-Simulation erzeugt werden, die die Güte der Simulationsergebnisse positiv beeinflussen. Außerdem können über die Zeit Daten zur thermischen Belastung der Laufbuchse gesammelt werden. Hierfür wurde ein Tool zur Datenaufbereitung in MATLAB programmiert.

In Abbildung 54 kann die Lastabhängigkeit der Laufbuchsentemperaturen an den Messpositionen 1-4 (Brennraumbereich) beobachtet werden.

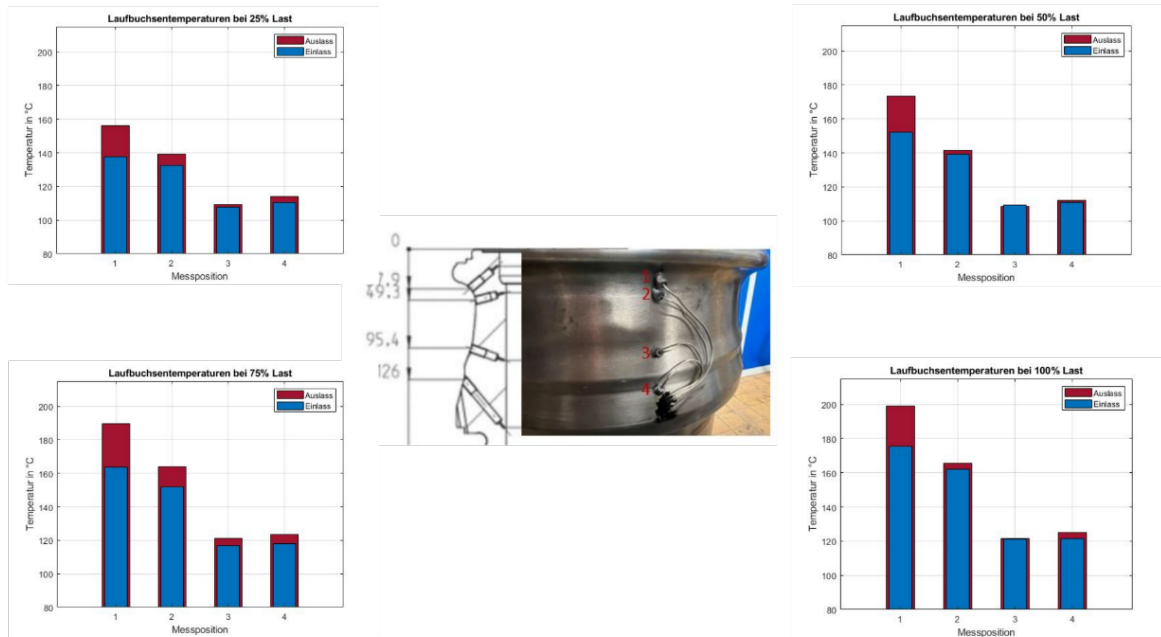


Abbildung 54: Lastabhängigkeit der Laufbuchsentemperaturen

Ergebnisse der Analyse der Laufbuchsentemperaturen bei Wasserstoffzumischung sind in Abbildung 55 dargestellt. Hier sind die Laufbuchsentemperaturen des obersten Thermoelements auf der Auslassseite (rot-orange) und der Einlassseite (blau) dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass eine höhere Wasserstoffzumischung höhere Laufbuchsentemperaturen verursacht. Es ist auch zu beobachten, dass sich der Bereich, in dem der Verbrennungsschwerpunkt (Alpha 50) eingestellt werden kann, mit zunehmender Wasserstoffzumischung verkleinert. Diese Erkenntnisse sind wichtig für die zukünftige Herstellung von Laufbuchsen, die mit Wasserstoffzumischungen betrieben werden sollen, da die Materialien auf Dauer den höheren Temperaturen Stand halten müssen.

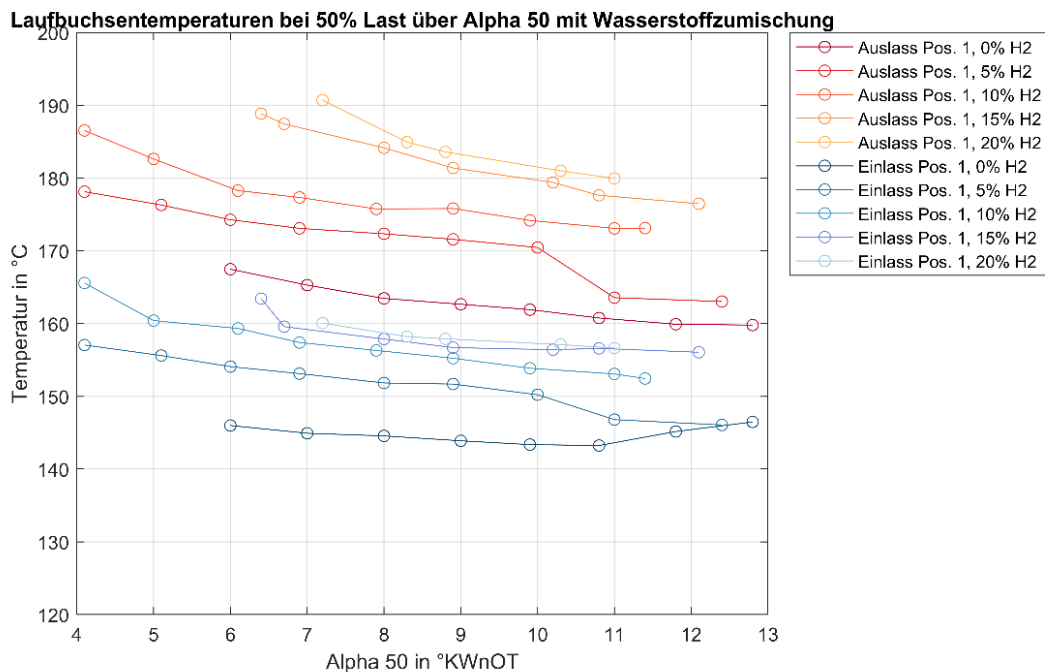


Abbildung 55: Einfluss von Wasserstoffzumischung auf Laufbuchsentemperatur

Im Rahmen der verschiedenen Brennverfahrensanalysen wurden am Forschungsmotor mehrere, in der Geometrie identische Kolbenoberteile mit unterschiedlichen Ringnutfertigungsverfahren sowie einer Beschichtung gegen Wasserstoffversprödung eingesetzt und einem definierten Versuchsprogramm unterzogen. Mithilfe der installierten Messtechnik (z.B. Blow-by Meter, Kurbelgehäuseanalyse, Laufbuchsentemperaturen) und der erweiterten Auswertemethoden konnte der Belastungszustand über einen längeren Zeitraum hinweg präzise dokumentiert und ausgewertet werden. Mithilfe der Blowby-Messungen am LKV und einer Verschleißanalyse durch Kolbenschmidt konnte das neue Fertigungsverfahren prinzipiell für den Serienbetrieb freigegeben werden.

Die inhaltliche Bewertung der Verschleißzustände lag im Aufgabenbereich der jeweiligen assoziierten Projektpartner. Mithilfe der durch den LKV gesammelten Messdaten konnten Informationen gewonnen werden. Die Versuche im Rahmen des AP 5.5 wurden sinnvoll mit den übrigen Arbeitspaketen kombiniert, sodass Synergien genutzt werden konnten und parallel zu Untersuchungen bezüglich anderer Technologiekonzepte Erkenntnisse über die Bauteilbelastung gesammelt werden konnte.

Des Weiteren wurde in Kooperation mit Kolbenschmidt ein experimentelles Kolbenoberteil konstruiert und gefertigt, welches für den Betrieb mit Gasdirekteinblasung gedacht war. Diesbezügliche Informationen sind in AP2.3 sowie AP7.1 zu finden.

Die in diesem Arbeitspaket untersuchten Zusammenhänge und erlangten Erkenntnisse tragen nicht direkt zum Hauptziel des Projekts TEME2030+, der Reduzierung der Treibhausgasemissionen, bei. Die erlangten Erkenntnisse können in zukünftigen Motorenentwicklungen mit alternativen Kraftstoffen oder neuartigen Brennverfahren zur Bauteiloptimierung beitragen.

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

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden Untersuchungen mit den nachhaltigen Kraftstoffen Wasserstoff (dem Erdgas zugemischt) und HVO zur Substitution des Brenngases bzw. Pilotkraftstoffs durchgeführt. Zunächst soll auf die Wasserstoffzumischung zum Brenngas eingegangen werden. Dafür wurde die Gasmischanlage um einen Wasserstoffzumischpfad erweitert. Dieser bietet die Möglichkeit, dem Erdgas bis zu 6 kg/h Wasserstoff zuzumischen. Das entspricht in der Volllast ca. 30 vol.-% bzw. 10 e.-%. In der Teillast können entsprechend auch höhere Anteile untersucht werden.



Abbildung 56: Wasserstoffpfad innerhalb der Gasmischstrecke

An der vorgelagerten Wasserstoffversorgungsanlage können Wasserstofftrailer oder Flaschenbündel zur Versorgung angeschlossen werden.



Abbildung 57: Wasserstoffpfad innerhalb der Gasmischstrecke

Zur korrekten Bestimmung der Brenngasqualität bei Zumischung von Wasserstoff ist der bestehende Erdgaschromatograph um eine eigene Einheit für die Erfassung des Wasserstoffgehaltes im Brenngas erweitert worden. Im Zuge der zukünftigen Zumischung von Wasserstoff musste auch der Berechnungsalgorithmus zur Methanzahlbestimmung angepasst werden. Hierzu wurde die in der EN ISO 23306 angegebene MZ_{PKI} (Propane Knock Index) Methode in die Messdatenerfassung integriert.



Abbildung 58: Wasserstoffchromatograph

In ersten Stichversuchen konnten bereits bis zu 52 Vol.-% Wasserstoffanteil (das entspricht 10 Ma.-%) im Brenngas über den Versuchsträger umgesetzt werden. Auffällig dabei war, dass entgegen der Vermutung der sehr klopfreudige Wasserstoff zu keinem Anstieg der Klopfintensität führte. Abbildung 59 zeigt den Zusammenhang der masse-, energie- sowie volumenbezogenen Wasserstoffanteile im Erdgas.

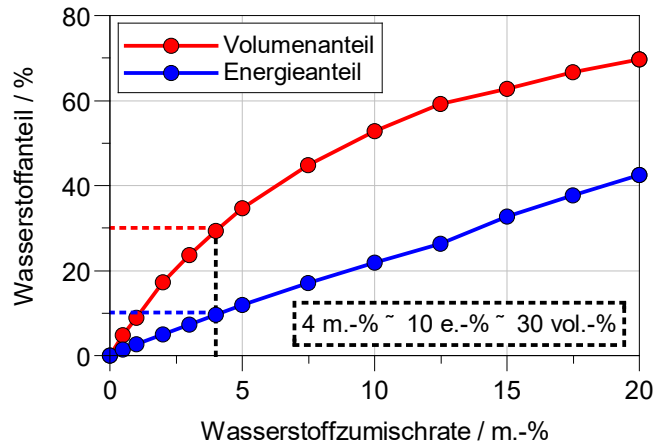


Abbildung 59: Zusammenhang von volumetrischem, energiebezogenen und massebezogenen Wasserstoffanteilen bei Zumischung zu Erdgas aus dem öffentlichen Erdgasnetz

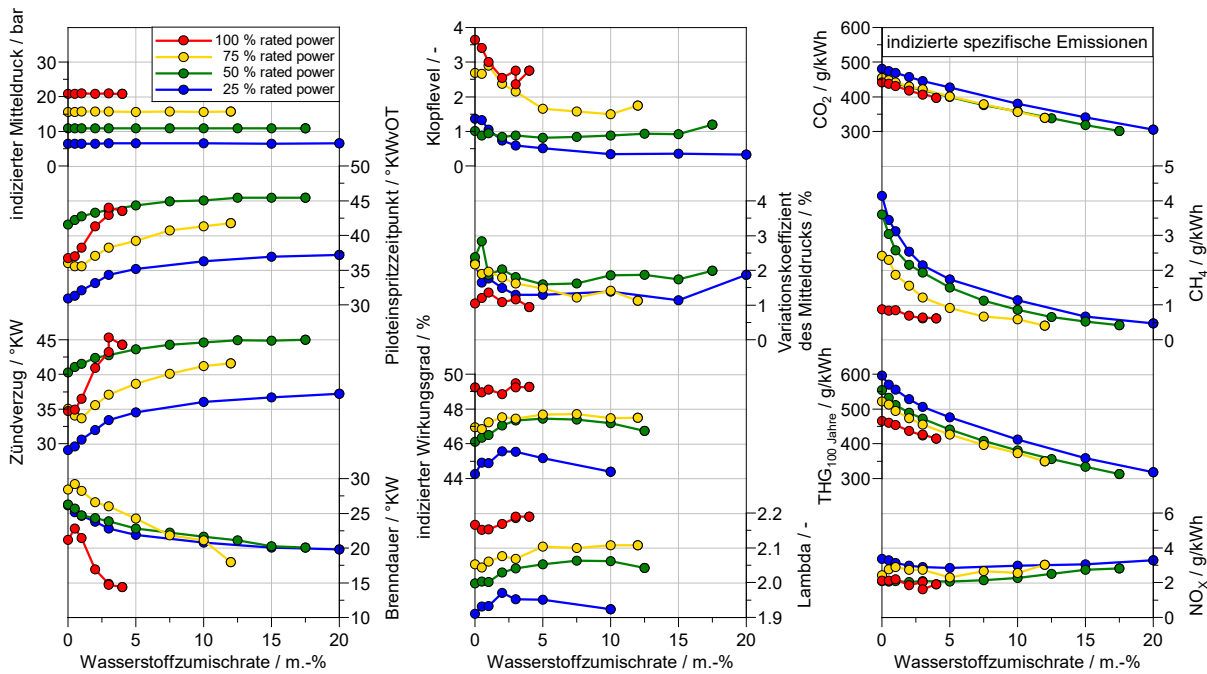


Abbildung 60: Untersuchung des Einflusses der Wasserstoffzumischrate auf die wichtigsten Kenngrößen hinsichtlich Verbrennungscharakteristik und Emissionen bei verschiedenen Lastpunkten

Im Rahmen der Messkampagnen wurde eine umfangreiche Versuchsmatrix mit unterschiedlichen Zumischraten bei unterschiedlichen Lastpunkten durchgeführt. Des Weiteren wurden diverse Motorbetriebsparameter wie Schwerpunktlage und Luftverhältnis weiteren Detailuntersuchungen unterzogen, welche bereits auf dem CIMAC Kongress 2025 veröffentlicht wurden. Als Ergebnis dieser Untersuchungen konnte der Einzylindermotor ohne Anpassungen der Hardware in einem weiten Kennfeld sicher und effizient betrieben werden. Voraussetzung dafür war lediglich die Verwendung eines geschlossenen Regelkreises auf Basis der Echtzeit-Zylinderdruckauswertung, um die geänderten Verbrennungseigenschaften des Gasmischs (steigende Flammgeschwindigkeit bei H₂-Zumischung) durch einen angepassten Piloteinspritzzeitpunkt auszugleichen. Abbildung 60 zeigt die Ergebnisse bei einer Erhöhung der H₂-Zumischrate bei verschiedenen Lastpunkten mit aktivierter Schwerpunktlagenregelung via Anpassung des Piloteinspritzzeitpunkts.

Bereits bei geringen H₂-Zumischraten ist ein großer Einfluss auf die Verbrennung festgestellt worden. Grundsätzlich wirkt sich der Wasserstoff durch zwei unterschiedliche Mechanismen aus: Zum einen wird durch die Substitution von kohlenstoffhaltigem Erdgas durch kohlenstofffreien Wasserstoff der Ausstoß von CO₂-Emissionen analog zum energiebezogenen Wasserstoffanteil reduziert. Zum anderen beeinflusst der Wasserstoff auch die Verbrennung des übrigen Erdgases zum Positiven. Zumischraten bis zu 5 m.-% (ca. 35 vol.-%) wirken sich positiv auf die

Verbrennungsstabilität, den Wirkungsgrad und insbesondere die CH₄-Emissionen aus, was aufgrund des hohen Treibhauspotenzials von Methan zu einer signifikanten Reduzierung der Gesamt-Treibhausgasemissionen führt. Wasserstoffzumischung bietet also das Potenzial, besonders in Teillastbetriebspunkten eine überproportionale Reduzierung der THG-Emissionen zu erzielen, wie in Tabelle 9 dargestellt ist.

Tabelle 9: Reduzierungspotenzial der Treibhauseffekt-relevanten Emissionen bei unterschiedlichen Lastpunkten mit 5 m.-% Wasserstoffzumischung (bei Volllast 4 m.-% Zumischrate)

Last	%	25	50	75	100
H ₂ -Zumischung	e.-%	11	11	11	10
CO ₂	%	-11	-12	-12	-10
CH ₄	%	-58	-58	-62	-30
THG _{100 Jahre}	%	-20	-20	-18	-11

Mit den Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass bereits geringe Anteile Wasserstoff eine überproportional große Verbesserung der Treibhausgasemissionen bewirken. Des Weiteren konnte das Potenzial zur THG-Reduzierung für die Anwendung in einem mittelschnelllaufenden Dual-Fuel Motors genau quantifiziert werden, wodurch eine Datenbasis für die Auslegung/Berechnung vergleichbarer Anwendungen geschaffen werden konnte.

Des Weiteren wurden diverse Betriebsparameter (Lambda, Verbrennungsschwerpunkt, Pilotmenge) Detailuntersuchungen unterzogen. Beispielhaft sind Ergebnisse für CH₄ und NO_x bei 50 % Last mit unterschiedlichen Zumischraten dargestellt. Der Wasserstoff ermöglicht durch die verbesserten Brennbedingungen einen deutlich breiteren fahrbaren Betriebsbereich. Auch späte Schwerpunktlagen oder hohe Lambda-Werte, bei denen typischerweise die CH₄ Emissionen stark ansteigen, können so mit moderaten CH₄ Emissionen gefahren werden. Das bietet Freiheiten in Bezug auf das Einhalten des IMO Tier III Grenzwerts für NO_x Emissionen: um den Grenzwert einhalten zu können, kann der Betriebspunkt im typischen NO_x-CH₄-Trade-Off deutlich weiter in Richtung niedriger NO_x Emissionen verschoben werden, ohne dabei die CH₄ Emissionen zu stark ansteigen zu lassen.

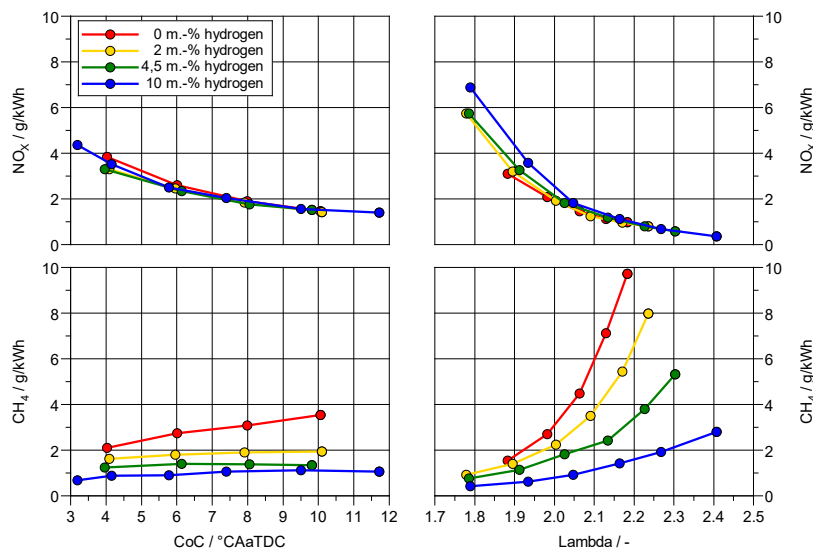


Abbildung 61: Einfluss von Schwerpunktlage und Lambda auf die Emissionen bei 50 % Last

Neben den Untersuchungen mit Wasserstoffzumischung zum Brenngas wurden auch Untersuchungen mit HVO als Pilotkraftstoff durchgeführt, um die aus dem üblicherweise fossilen Flüssig-Pilotkraftstoff resultierenden CO₂ Emissionen zu reduzieren.

Abbildung 62 zeigt den Vergleich exemplarischer Ergebnisse bei der Verwendung von HVO im Vergleich zu Diesel EN 590 als Pilotkraftstoff anhand von Schwerpunktvariationen bei 50 % Last mit 4,5 m.-% H₂-Zumischung. Grundsätzlich verhalten sich die beiden Pilotkraftstoffe ähnlich. Die NO_x-Emissionen zeigen den typischen Verlauf mit hohen Werten bei früher Schwerpunktlage. Bei HVO fallen sie über den gesamten Bereich ca. 15 % niedriger aus. Bei Einhalten des IMO Tier 3 Schwellwerts könnten also tendenziell frühere Schwerpunktlagen und damit ein

höherer Wirkungsgrad erreicht werden, sodass die Gesamt-Treibhausgasemissionen reduziert werden können. Die CH₄-Emissionen sind durch H₂-Zumischung von 4,5 Ma.-% in diesen Versuchen verhältnismäßig gering und auch bei späten Schwerpunktlagen steigen sie kaum an. In den untersten beiden Diagrammen ist der Anteil der THG-Emissionen, die aus dem Pilotkraftstoff entstehen (Annahme: vollständige Umsetzung in CO₂ und H₂O), an den Gesamt-THG-Emissionen auf 20 bzw. 100 Jahre gerechnet dargestellt. Auf 100 Jahre gerechnet macht der Pilot-Kraftstoff in dieser Messreihe dementsprechend einen Anteil von ca. 10 % aus. Bei einem rechnerischen THG-Minderungspotenzial von HVO gegenüber Diesel von ca. 50 – 90 % könnten damit die THG-Emissionen durch die Pilotkraftstoffalternative insgesamt um 5 – 9 % reduziert werden. Trotz der energiebezogenen geringen Anteile des Pilotkraftstoffs am Gesamtkraftstoffverbrauch können also aufgrund des im Vergleich zum Brenngas größeren Kohlenstoffanteils die THG-Emissionen signifikant reduziert werden. Da bei unterschiedlichen Lastpunkten vorrangig die Gasmenge erhöht wird und die Pilotmenge relativ konstant gehalten wird, sinkt mit steigender Last der Anteil der aus dem Pilotkraftstoff resultierenden CO₂ Emissionen.

Über das gesamte Lastprofil liegt der Anteil der aus dem Pilotkraftstoff resultierenden THG Emissionen ca. im Bereich von 7 – 9 %, mit der oben genannten Größenordnung des Minderungspotenzials könnten durch den Wechsel des Pilotkraftstoffs ca. 3 bis 8 % der THG Emissionen (auf 100 Jahre gerechnet) eingespart werden.

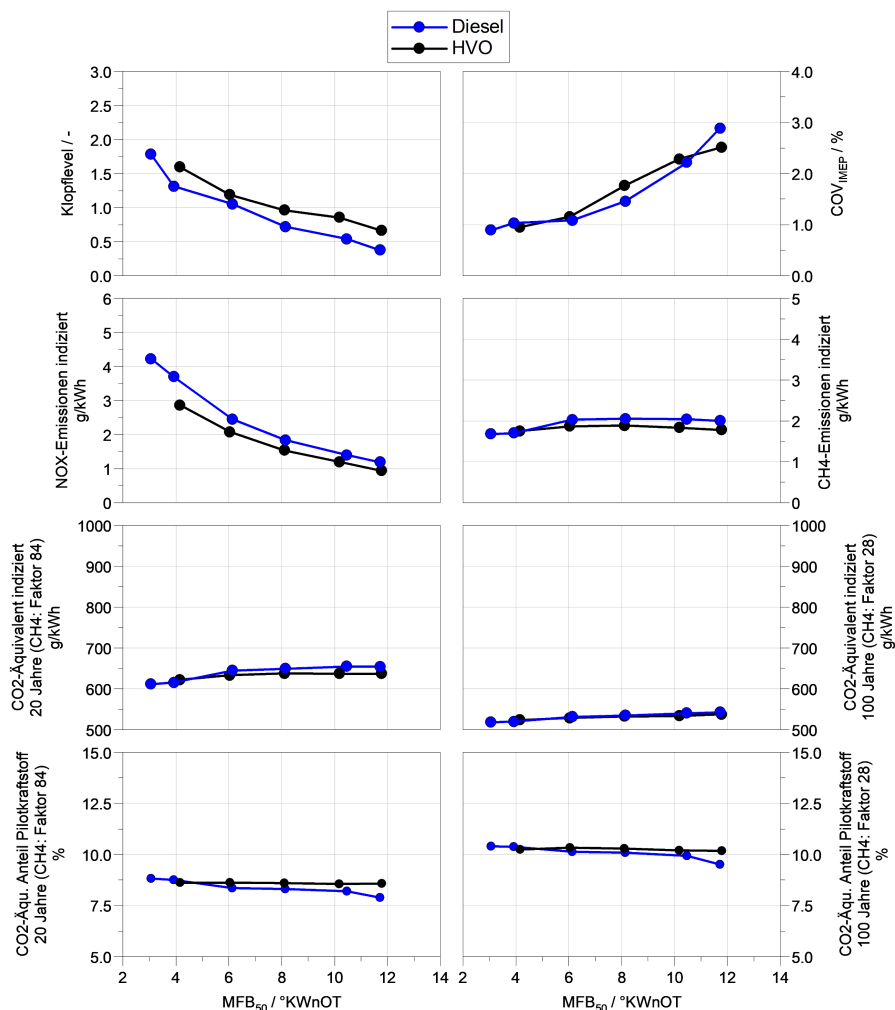


Abbildung 62: Analyse des Einflusses des Pilotkraftstoffs Schwerpunktvaryationen bei 50 % Last mit 4,5 m.-% Wasserstoffzumischung

Um diesen CO₂ Vorteil nutzen zu können, sind bis auf den Austausch des Pilotkraftstoffs beim Tankprozess keine Hardwareanpassungen erforderlich. Allerdings muss durch die höhere Zündwilligkeit von HVO das Pileiteinspritztiming angepasst werden, um vergleichbare Betriebspunkte einstellen zu können. Dies ist in Abbildung 63 an den früheren Einspritzzeitpunkten (SOI) für eine konstante Schwerpunktlage (MFB₅₀) erkennbar. Im Motorsteuergerät muss also ein geeignetes Regelungskonzept auf Basis der Zylinderdruckauswertung zum Einsatz kommen.

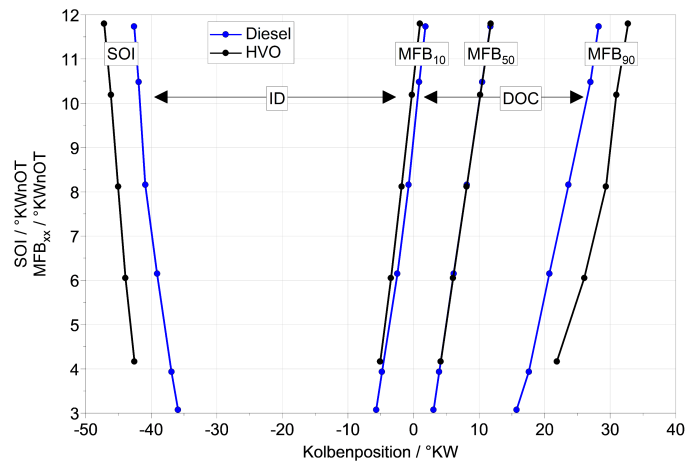


Abbildung 63: Einfluss des Pilotkraftstoffs auf den Heizverlauf anhand von zwei Verbrennungsschwerpunktvariationen bei Verwendung von HVO bzw. Dieselpilotkraftstoff mit konstanter Einspritzmenge und ansonsten vergleichbaren Betriebsparametern (50 % Motorlast; 2,05 bara Ladedruck; ca. 60 mg/ASP Pilotmenge; 4,5 Ma.-% H₂-Zumischung)

2.1.12 AP 6: Aufbau Teilkonzept Technologieträger TEME2030+

Im Rahmen des AP 6 als Abschluss der Niederdrucktechnologiekonzepte sollte eine Gesamtbewertung dieser Konzepte sowie die Kombination sinnvoller Technologiekonzepte untersucht werden. Während das Projekt ursprünglich in den drei Hauptsäulen ND / MD / HD geplant wurde, stellte sich während der Projektbearbeitung heraus, dass die Niederdrucktechnologien beispielsweise auch in Kombination mit den Brennverfahren mit Gasdirektinblasung sinnvoll waren bzw. auch direkt mit diesen in Bezug auf das THG-Minderungspotenzial zu vergleichen sind. Die Potenzialbewertung der einzelnen TKs erfolgt daher gebündelt in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** (AP 9), um Überschneidungen/Wiederholungen zu vermeiden.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden jedoch bereits verschiedene Kombinationen aus Technologien untersucht und den Projektpartnern Ergebnisse nach Bedarf zu Verfügung gestellt. Experimentell untersucht wurden beispielsweise die folgenden Kombinationen:

Tabelle 10: Experimentell untersuchte Technologiekonzepte am Einzylinder Forschungsmotor

Kombinationen Technologiekonzepte Säule 1					
	VCR	MOC	AGR	HVO	H2
VCR			x		x
MOC					x
AGR					x
HVO					x
H2					

Versuche mit dem MOC wurden aufgrund der kurzen Haltbarkeit nur in geringem Umfang durchgeführt. Versuche mit HVO als Pilotkraftstoff wurden zur Reduzierung der Versuchsumfänge nur im Rahmen der Wasserstoff-Messkampagne durchgeführt, da hieraus keine signifikant neuen Erkenntnisse zu erwarten waren.

2.1.13 AP 7: Potenzialanalyse MD- & HD-Gasdirektinblasung bei DF-Brennverfahren

Zielsetzung

Das Arbeitspaket 7 verfolgte das Ziel, ein gasbasiertes Direktinblssystem für Hochdruck- und Mitteldruckanwendungen zu entwickeln, aufzubauen und sowohl am Komponenten- als auch am Motorprüfstand zu erproben. Im Mittelpunkt stand die Bereitstellung eines robusten Systems zur Direktinblasung alternativer

Brenngase – insbesondere Methan – in den Brennraum, um die technologische Grundlage für ein emissionsarmes und effizientes Dual-Fuel-Hochdruckbrennverfahren zu schaffen.

Auslegung und Beschaffung Injektoren

Die Injektorentwicklung wurde gemeinsam mit den Firmen DUAP AG und ITAZ GmbH durchgeführt. Ursprünglich lag die Verantwortung für Vorgaben und motorseitige Entwicklung bei Caterpillar; diese Aufgaben wurden nach dem Ausscheiden von Caterpillar aus dem Projekt von der Universität Rostock übernommen. In enger Zusammenarbeit wurde eine Spezifikationsliste für die Injektoranforderungen erstellt, Randbedingungen aus dem Prüfstandsbetrieb fixiert und ein Design-Freeze für die geometrische Kompatibilität mit der bestehenden Prüfstandsstruktur erarbeitet.



Abbildung 64: Prototyp von den Firmen DUAP AG / ITAZ GmbH entwickelte DI-Gas-Injektor

Es wurden zwei Injektorvarianten entwickelt. Die Medium Pressure Direct Injection (MPDI) ist für ein vorgemischtes Brennverfahren ausgelegt; das Gas wird nach dem Schließen des Auslassventils, jedoch vor der Einbringung des Diesel-Piloteinspritzsignals eingebracht. Der Injektor ist für Gasdrücke bis 80 bar ausgelegt. Die High Pressure Direct Injection (HPDI) adressiert ein diffuses Brennverfahren, bei dem das Gas während oder nach dem Diesel-Piloten eingebracht wird; hierfür sind aufgrund der fortgeschrittenen Verdichtung im Kompressionstakt Gasdrücke bis 500 bar injektorseitig erforderlich. Außerdem wird eine zusätzliche Stickstoff-Infrastruktur als Steuermedium bis 80 bar Gasdruck benötigt, was über einen entsprechenden Anschluss am Injektor anliegt. Beide Verfahren zielen darauf, Methanschlupf über den Ladungswechsel zu vermeiden, die Ladung nur teilhomogen zu gestalten – mit Gaszentrierung im Brennraummittelpunkt – und so unverbrannte Methanester, Quenchbereiche sowie kalte Brennbereiche entlang der gekühlten Zylinderwand zu vermeiden. Gleichzeitig wird über einen besseren Umsetzungsgrad eine Effizienzsteigerung und damit eine Reduzierung der NO_x -Emissionen angestrebt.

Die beiden Varianten werden über eine zentrale Bohrung in den Zylinderkopf eingebracht. Die Injektoren erlauben die Zudosierung von Wasserstoff. Beide Varianten besitzen einen geometrisch identischen Aufbau, wodurch ein Austausch ohne Anpassungen an der Prüfstandsstruktur möglich ist. Die Form der Gasausbreitung lässt sich über den Düsenaufsatz („Strahlführung“) einstellen. Ergänzend wurde ein Lanzenkonzept entwickelt, das die Gaszuführung von der Infrastruktur durch den Zylinderkopf bis in den Injektor ermöglicht.

Prüfstände zur Injektorcharakterisierung

Aufbau der Hochdruck-Gasinfrastruktur

Für die Injektorcharakterisierung wurde aufgrund der erwarteten geringen Erdgas-Massenströme auf eine permanente Kraftstoffbereitstellung verzichtet und stattdessen auf vorgefüllte Gasspeicher gesetzt. Hierzu wurden Ressourcen der bestehenden Infrastruktur am Technikhof der Universität Rostock genutzt, insbesondere ein Gasspeicher und eine Vorverdichterstation. Da deren Gasdruck für das angestrebte Druckniveau nicht ausreichte, wurde eine zweite Verdichterstufe integriert, die das vorverdichtete Gas auf bis zu 600 bar brachte. Ein Sicherheits- und Druckregelungskonzept wurde erarbeitet, das Bauteilschutz und sichere Bedienung am Prüfstand gewährleistet. Die Gasdruckbereitstellung erfolgte unabhängig von der Infrastruktur des Forschungsmotors, um einen parallelen Betrieb der Charakterisierungsprüfstände sicherzustellen.

Einblaseverlaufsindikator

Auf Basis vorhandener Erfahrungen mit einem bereits entwickelten Gas-Einblaseverlaufsindikator (Gas-EVI) für Niederdruckeinblasungen wurde ein neuer Einblaseverlaufsindikator nach dem Messprinzip nach Zeuch entwickelt. Das System erfasst die Einspritzrate des Gases pro Schuss quantifiziert und hochpräzise sowie charakteristische Größen wie Einblasedauer und Injektorverhalten unter variierenden Randbedingungen. Ausgelegt ist die Messkammer auf Drücke bis 35 bar. Der Prüfstand ist mobil, vollständig fernsteuerbar – dem Umgang mit hohen Gasdrücken geschuldet – und modular aufgebaut.

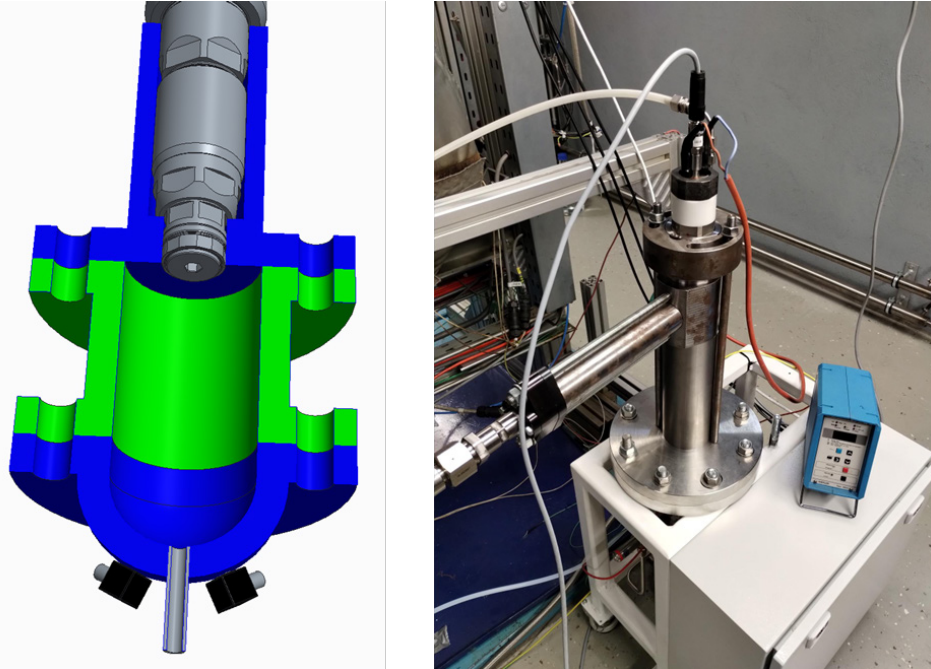


Abbildung 65: Einblaseverlaufsindikator mit MPDI-Injektor; links: Schematische Darstellung mit Injektor- & Messkammerflansch (blau) sowie Zusatzvolumen (grün); rechts: Prüfstands Aufbau mit Gaszufuhr Lanze und angeschlossener Peripherie

Die Module umfassen einen Injektorflansch, ein Messkammervolumen mit Anschlüssen für hochaufgelöste Druckmessung an verschiedenen Positionen, Temperaturerfassung sowie einen Ausgang mit angebundener Gegendruckregelung und Sicherheitskomponenten. Das Messkammervolumen ist durch zwischengesetzte zylindrische Zusatzvolumina erweiterbar. Zusätzlich wurde eine Konstruktion zur Adaption eines Zylinderkopfes für die Gaszuführung über die Lanze realisiert.

Hochdruck-Hochtemperatur (HDHT) Einspritzkammer

Die bestehende HDHT-Einspritzkammer wurde angepasst, um das über die Injektoren eingebrachte Gas visuell zu erfassen. Sie bildet die Brennraumzustände des Forschungsmotors zum Zeitpunkt der Gaseinbringung hinsichtlich Druck, Temperatur, Dichte und Gasatmosphäre realitätsnah nach. Die gasförmige Phase wird über das Schlierenverfahren sichtbar gemacht; ein in Düsennähe möglicher kurzzeitiger Phasenübergang in die Flüssigphase infolge starker Expansion kann zusätzlich über das Streulichtverfahren detektiert werden.

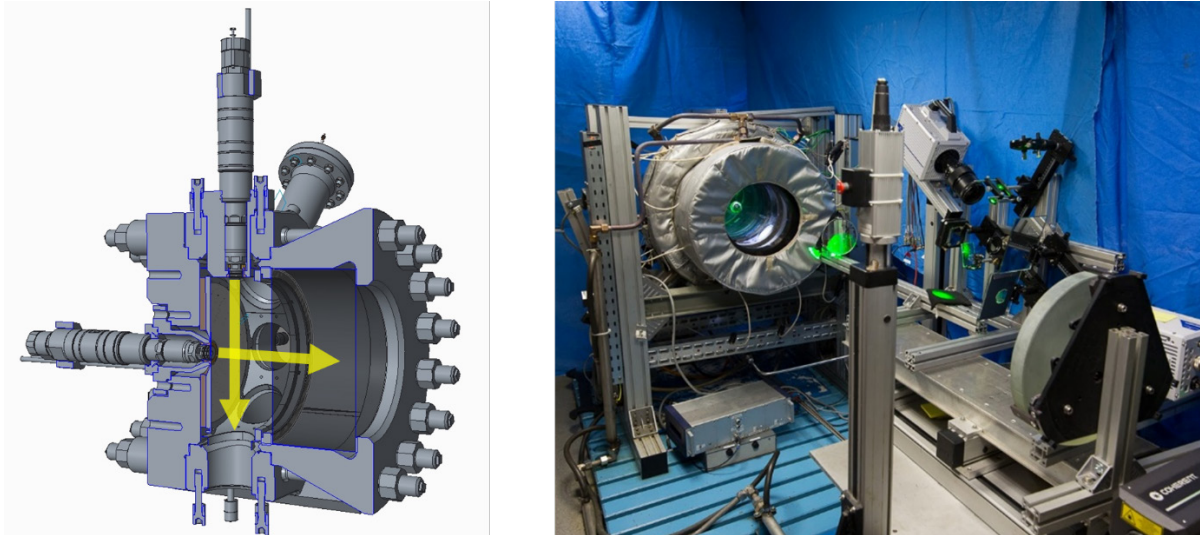


Abbildung 66: Hochdruck-Hochtemperatur-Einspritzkammer der Universität Rostock; links: Schematische Darstellung mit möglichen Injektor-Positionen für Spraybilduntersuchungen, rechts: Gesamt auf Aufbau mit Kamerasystemen

Konstruktiv wurden Flansche zur Kopplung zwischen Kammer und Injektor geschaffen. Seitliche Aufnahmen, orthogonal zur Injektorachse, visualisieren Sprays mit Strahlführung, die eine hohe Eindringtiefe und einen schmalen Kegelwinkel aufweisen; frontale Aufnahmen in Injektorachsenrichtung zeigen Sprays ohne Strahlführung mit geringer Eindringtiefe und breitem Kegelwinkel. Die Flanschkonstruktionen verfügen über ein Kühlsystem zur Konditionierung der Gasaustrittsdüse.

Sicherheitskonzept

Da gasförmiger Kraftstoff eingesetzt wird, wurde ein erweitertes Sicherheitskonzept implementiert. Eine Gaswarnzentrale mit Sensorik detektiert Leckagen an verschiedenen Punkten der Gasinfrastruktur. Ein Lüftungskonzept mit Notabluft ermöglicht den sofortigen Raumlftwechsel. Eine Softwarestrategie stellt die unmittelbare Druckentlastung des Systems bei undefinierten Betriebszuständen sicher. Zudem erlaubt eine Spüleinrichtung die Inertisierung der Gasinfrastruktur mit Stickstoff, um die Bildung brennbarer Gasgemische zu verhindern.

Messstrategien

Die Messstrategie umfasste systematische Parameterstudien sowohl mit dem EVI-Prüfstand als auch in der HDHT-Kammer. Die Zuordnung der Parameter zu den jeweiligen Prüfständen folgte dem Ziel, Einblasecharakteristiken sowohl zeitaufgelöst als auch spritzbildbezogen zu erfassen.

Tabelle 11: Zuordnung der untersuchten Einflussparameter auf Einblasecharakteristik

Einfluss	EVI	Kammer
Ansteuerdauer	✓	✓
Gasdruck	✓	✓
Brennraumdruck	✓	✓
Brennraumtemperatur	x	✓
Brennraumdichte	x	✓
Druckdifferenz	✓	x
Mehrfacheinblasung	✓	✓
Verrohrung	✓	✓
Modellgenerationen	✓	✓
Bestromung	✓	x
Dichtungsintegrität	✓	✓
Steuer gas	✓	✓

Jeder Parameter wurde einzeln variiert, um die Auswirkungen auf das Brennverfahren abzuleiten. Für die Ansteuerdauer wurden Mengenkennfelder erstellt und anwendbare Betriebsbereiche identifiziert. Die Variation des Gasdrucks diente der Analyse des Düsenverhaltens bei unterschiedlichen Vordrücken im Injektor. Der Brennraumdruck wurde zur Abbildung verschiedener Einbringungszeitpunkte des Gases und dessen Auswirkung auf das Düsenverhalten untersucht. Die Brennraumtemperaturstudie zielte auf deren Einfluss auf die Spraycharakteristik. Über eine gekoppelte Variation von Druck und Temperatur bei gleicher Dichte wurde gezeigt, dass identische Dichten zu identischen Spraycharakteristika führen. Die Betrachtung der Druckdifferenz erlaubte den Abgleich theoretisch gleicher Einspritzmassen bei verschiedenen Betriebszuständen. Mehrfacheinblasungen wurden eingesetzt, um die Möglichkeit einer segmentierten Massenaufteilung nachzuweisen. Ergänzend wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Verrohrungsquerschnitte auf die Gasmassenbereitstellung, die Performance verschiedener Injektor-Modellgenerationen, die Variation von Bestromungsprofilen im Steuergerät, die Dichtungsintegrität über die Düse sowie der Einfluss des Steuergasdruckniveaus (HPDI) untersucht.

Ergebnisse

Definitionen

Zur Auswertung wurden die Kennwerte Öffnungsverzug, Schließverzug und Einblasedauer definiert. Der Öffnungsverzug ist die Zeit zwischen dem Start der Bestromung und dem Beginn der Einblasung, identifiziert durch den Übergang des Druckdifferenzverlaufs von negativ zu positiv. Der Schließverzug beschreibt die Zeit zwischen dem Ende der Bestromung und dem Ende der Einblasung, markiert durch den Wechsel des Druckdifferenzverlaufs von positiv zu negativ. Die Einblasedauer ist die Zeitdifferenz zwischen Beginn und Ende der Einblasung.

Einblaseverlaufsindikator-Messungen mit Mitteldruck- und Hochdruckinjektor

Die Untersuchungen umfassten zeitaufgelöste Signalverläufe während einer Einblasung und quantitative Vergleiche der Einblasecharakteristiken. Die Auswertung basierte auf zeitlich aufgelösten und massenbezogenen Darstellungen, insbesondere der Einspritzrate als Funktion der Zeit sowie der daraus pro Schuss resultierenden eingebrachten Masse. Sie erlaubte Rückschlüsse auf die Trägheit des Gesamtsystems, etwa auf Verzögerungen zwischen Bestromung und Einblasung oder auf die Dauer der Gaseinbringung. Beide Injektorvarianten wurden mit Strahlführung vermessen; aufgrund der in der Messkammer dominierenden globalen Bedingungen ergaben sich keine erkennbaren Unterschiede zu Messungen ohne Strahlführung. Die statischen Messbedingungen bilden lediglich die Druckerhöhung durch die Einblasung des Gases ab, ohne eine Nachbildung der druckdynamischen Kolbenbewegung zu berücksichtigen. Abgebildet wurde das Druckniveau zum Einspritzbeginn, eine Temperaturanpassung erfolgte nicht. Als Medium wurde Erdgas verwendet, eine Wasserstoffzudosierung fand in den Messungen nicht statt. Gelegentliche Abweichungen einzelner Messwerte von den erwarteten Phänomenen waren auf die hohe Sensitivität bei der Detektion von Einblasbeginn und -ende zurückzuführen, die ihrerseits von zahlreichen Variablen beeinflusst wird.

Für die Gasinfrastruktur wurden mehrere Rohrinne Durchmesser untersucht. Ein Aufbau entsprach der Verrohrung am Forschungsmotor mit 7,9 mm Innendurchmesser; ergänzend wurde eine idealisierte Infrastruktur mit 19 mm Innendurchmesser realisiert, die aufgrund der verwendbaren Verschraubungen nur für den Mitteldruckfall einsetzbar war. Zur Validierung erfolgte eine Simulation an der OTH Regensburg (Modell nach Prof. Borchsenius) sowie ein vollständiges experimentelles Messprogramm für beide Infrastrukturen. Die Simulation zeigte eine sehr gute Übereinstimmung mit den Experimenten. Da die Prüfstandsverrohrung grundsätzlich auf Hochdruck bis 600 bar ausgelegt ist, kam es bei den für vorgemischte Verfahren typischen niedrigen Drücken bereits während der Einblasung zu Einbrüchen des Injektionsdrucks – verursacht durch das ungünstige Verhältnis aus Rohrinnequerschnitt und Gasvordruck. Ideal wäre eine Einspritzrate mit Plateau, die ein konstantes Nachströmen bei voll geöffneter Düse (Vollhub) dokumentiert. In der idealisierten Verrohrung konnte nach dem initialen Vordruckeinbruch ein nahezu konstantes Druckniveau gehalten werden; in der Prüfstandsverrohrung fiel der Druck hingegen über die gesamte Einblasedauer ab. Eine Besonderheit des Injektors zeigte sich bei Vordrücken unter 15 bar: Die Düse ging in einen Teilhub mit veränderter Einblasecharakteristik über. Zeitlich aufgelöste Analysen wurden daher für die phänomenologische Betrachtung primär aus der idealisierten Infrastruktur abgeleitet, während Vergleiche der Betriebspunkte zwischen beiden Infrastrukturen die realen Randbedingungen am Forschungsmotor repräsentierten.

Erwartungsgemäß sollten die Erkenntnisse aus den MPDI-Versuchen sich mit steigenden Vordrücken in den Hochdruckmessungen fortsetzen; die Injektortechnologie war jedoch zum Untersuchungszeitpunkt noch nicht

vollständig ausgereift, sodass im Hochdruckbereich ab 300 bar Undichtigkeiten und interne Steuerungsprobleme zu deutlichen Messabweichungen resp. Verfälschungen führten, die nicht in die Analyse mit eingehen.

Ansteuerdauervariation

Mit zunehmender Ansteuerdauer erhöhte sich die in die Messkammer eingetragene Masse, und die resultierende Druckdifferenz nahm zu, während das Druckanstiegsverhalten über den betrachteten Bereich als konstant eingestuft wurde. Der Vordruck brach erst während der Einblasung ein, was auf die Entfernung zwischen Injektoreingang und Positionierung des Vordrucksensors innerhalb der Infrastruktur zurückgeführt wurde.

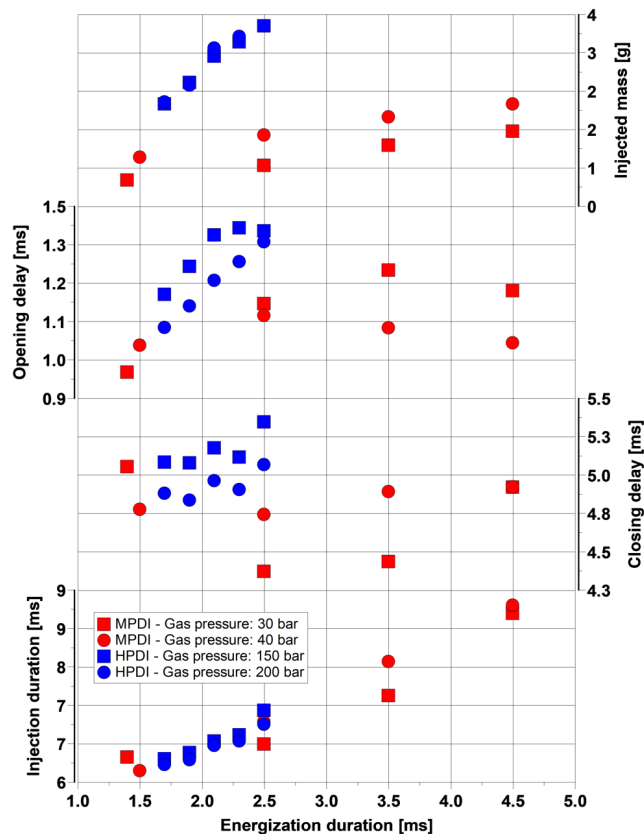


Abbildung 67: Beispielhafte Darstellung eines quantitativ aufgelösten Vergleichs zwischen Hochdruck- & Mitteldruck-Injektoren zu unterschiedlichen Ansteuerdauern

Mit steigendem Vordruck wurde der Vollhub in kürzerer Zeit erreicht, sofern der Injektor über diesen Zeitraum hinweg entsprechend angesteuert (bestromt) wurde. Die Einspritzrate zeigte ab diesem Zeitpunkt ein typisches Plateau, was ein kontinuierliches Gasaustritts-Massentrom aufzeigte. Dieses Phänomen war überwiegend bei den Mitteldruckversuchen erkennbar, da im Hochdruckbereich eine kontinuierlich geöffnete Düse eine weitaus größere Gasmenge eingebracht hätte, als sie für den Forschungsmotor üblich gewesen wäre. Hin zu kürzeren Ansteuerdauern lag ein ballistischer Bereich vor, in dem die Düse nicht vollständig öffnete. Die Zunahme der Masse bei steigender Ansteuerdauer resultierte unmittelbar aus der längeren Offenhaltezeit und der damit verlängerten Einblasedauer. Der Öffnungsverzögerung blieb aufgrund identischer Anfangsbedingungen annähernd konstant, während der Schließverzögerung mit steigender Ansteuerdauer anwuchs, bedingt durch die erhöhte magnetische Restemanenz, deren Abbau mehr Zeit beansprucht und den Schließvorgang der Düse später beginnen lässt.

Gasdruckvariation

Ein steigender Vordruck führte zu einem höheren Druckanstieg und zu höheren Spitzendrücken in der Messkammer sowie zu höheren Einspritzraten; die Zeit bis zur Ausbildung eines Plateaus verkürzte sich. Geringere Vordrücke gingen mit geringeren Druckeinbrüchen einher.

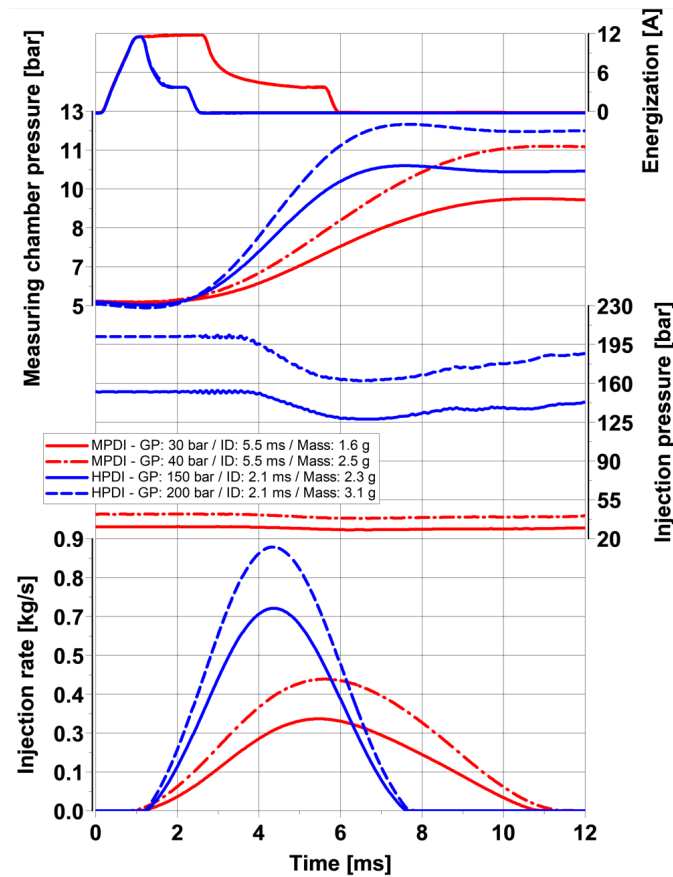


Abbildung 68: Beispielhafte Darstellung eines zeitlich aufgelösten Vergleichs zwischen Hochdruck- & Mitteldruck- Injektoren zu unterschiedlichen Gasdruckniveaus

Im MPDI-Teilhub bei niedrigen Vordrücken zeigten sich ähnliche Verläufe wie im Vollhub, allerdings mit deutlich verlängerten Einspritzdauern – eine Folge des Zusammenspiels aus Magnetkraft, Remanenz des Steuermagneten und der geringeren Gegenkräfte durch den niedrigeren Gasdruck. Mit steigenden Vordrücken nahm die eingeblasene Masse zu, der Öffnungsverzögerung verkürzte sich durch die öffnungsunterstützende Wirkung des Gasdrucks, und sowohl Schließverzögerung als auch Einspritzdauer sanken; im Vollhubbereich über 15 bar verhielten sich diese Kenngrößen weitgehend konstant. Im Teilhub traten demgegenüber deutlich höhere Verzögerungen und längere Einblasedauern auf.

Gegendruckvariation

Da in allen Messungen überkritische Strömung vorlag – der Gasdruck war zu jedem Zeitpunkt mindestens doppelt so groß wie der Gegendruck, und das Gas trat mit Schallgeschwindigkeit aus – zeigte der Gegendruck nur geringen Einfluss auf das reine Düsenöffnungsverhalten. Dennoch verringerte sich die eingebrachte Masse mit steigenden Gegendrücken, weil die Düse beim Öffnen mehr Gegenarbeit leisten musste.

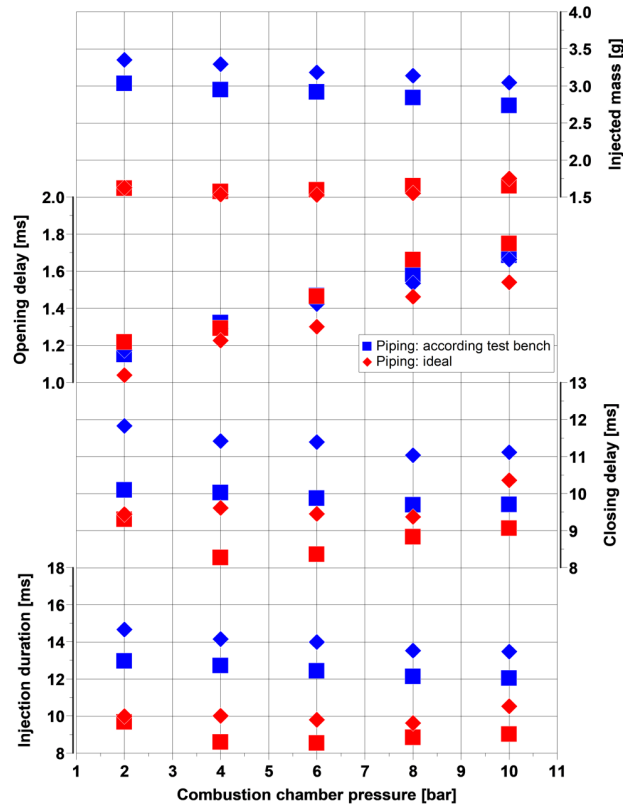


Abbildung 69: Beispielhafte Darstellung eines quantitativ aufgelösten Vergleichs von idealisierter & prüfstandsnaher Verrohrung bei unterschiedlichen Gegendruckniveaus

Der Öffnungsverzögerungswert nahm zu, während die Einspritzdauer und der Schließverzögerungswert sanken; ein hoher Schließverzögerungswert wurde der magnetischen Restremanz der Injektordüse zugeschrieben. Zu Beginn der Einspritzung führten gleiche Vordruckbedingungen zu ähnlichen Öffnungsverzögerungen; gegen Ende jedoch, bei deutlich abgesunkenem Vordruck, zeigten sich in der Prüfstandsinfrastruktur reduzierte Schließverzögerungen und kürzere Einspritzdauern. Zudem nahm die Schuss-zu-Schuss-Streuung bei sinkendem Gegendruck in der Prüfstandsinfrastruktur zu, während sie unter idealisierten Bedingungen nahezu konstant blieb.

Experimenteller Vergleich der Gasinfrastrukturen

Die Untersuchungen bestätigten, dass – abhängig vom Vordruckniveau – der Verrohrungsquerschnitt maßgeblich das Speichervolumen und die Drosselcharakteristika bestimmt. Aufgrund der Kompressibilität des Mediums Erdgas ergeben sich komplexere Anforderungen an die Kraftstoffbereitstellung als bei Flüssigkraftstoffen. Das für Hochdruck ausgelegte System des Forschungsmotors erwies sich für niedrige Drücke als ungeeignet, da trotz zusätzlicher Speicher das vorgelagerte Gasvolumen nicht ausreichte und der Querschnitt ein konstantes Nachströmen auf gleichbleibendem Druckniveau verhinderte. Im Messkammerdruckverlauf spiegelte sich dies im Ausbleiben eines Spitzendrucks wider; der Vordruckverlauf zeigte einen permanenten Abfall, und die Einspritzrate sank kurz nach Erreichen des Vollhubes kontinuierlich ab.

Im direkten Vergleich ergaben die idealisierten Messungen höhere eingespritzte Massen, geringere Schuss-zu-Schuss-Streuungen und niedrigere Öffnungsverzögerungen, gleichzeitig jedoch längere Einspritzdauern und höhere Schließverzögerungen. Diese Ergebnisse unterstreichen den dominanten Einfluss der Gasbereitstellung auf die Einspritzdynamik.

Hochdruck-Hochtemperatur-Einspritzkammer (HDHT) mit Mitteldruck- und Hochdruckinjektor

In der HDHT-Kammer wurden seitliche Sprayaufnahmen beider Injektorvarianten mit Strahlführung durchgeführt. Der analysierte Eindringtiefenbereich erstreckte sich bis 270 mm von der Düsenaustrittskante. Der Kegelwinkel des Gasstrahls wurde als doppelter Winkel zwischen der Randachse der Düse und der Ausbreitungsrichtung des Gasstrahls in einer Ebene orthogonal zur Injektorachse definiert; der sichere Messbereich ergab sich ab einem

Abstand von 150 mm zum Düsenaustritt. Auch in diesen Untersuchungen war ein Gasdruckeinbruch zu beobachten, da die Nachströmung über die Verrohrung bei zu geringem Rohrrinnenquerschnitt das Druckniveau während der Einblasung nicht aufrechterhalten konnte. Im Hochdruckbereich traten zudem Leckagen bei anliegendem Vordruck (selbst ohne Ansteuerung) auf, die die quantitative und visuelle Auswertung beeinflusste.

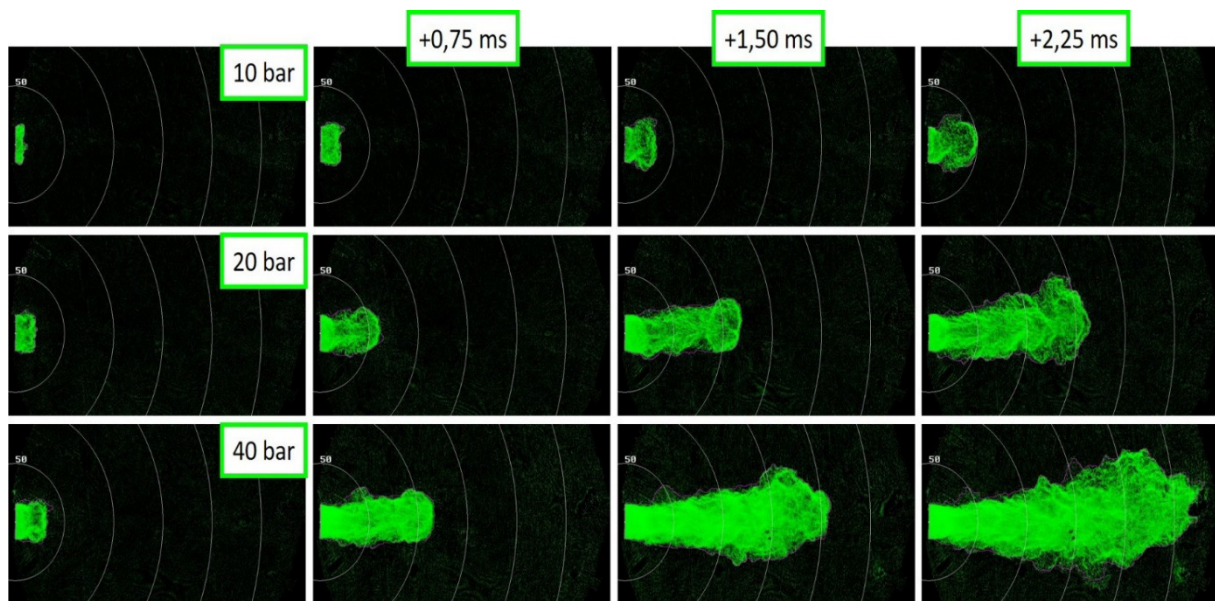


Abbildung 70: Auswertungen HDHT-Kammeruntersuchungen; Visuelle Darstellung der Gasausbreitung bei unterschiedlichen Vordrücken

Visuelle Spraybildanalyse

Für die Ansteuerdauer zeigte sich eine im Wesentlichen konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit, während sich der Kegelwinkel mit längerer Bestromung vergrößerte, da mehr Gasmasse nachgeschoben wurde. Unter Variation des Gasdrucks nahm die Ausbreitungsgeschwindigkeit proportional mit steigendem Vordruck ab; der Kegelwinkel pendelte sich weitgehend zwischen 16 und 20 Grad ein. Steigender Gegendruck – beziehungsweise steigende Dichte – reduzierte die Ausbreitungsgeschwindigkeit deutlich. Da der Gegendruck die Dichte etwa um eine Größenordnung stärker beeinflusst als die Temperatur, ist sein Einfluss auf die Gasdynamik entsprechend größer; dies ist insbesondere für unterschiedliche Miller-Varianten am Motor von Bedeutung. Mit ansteigendem Gegendruck nahm der Einfluss auf die Gasdynamik nach dem Vordruckeinbruch zu, während sich der Kegelwinkel auf einem nahezu konstanten Niveau stabilisierte. Eine erhöhte Temperatur – beziehungsweise eine verringerte Dichte – führte zu höheren Ausbreitungsgeschwindigkeiten, und der Kegelwinkel vergrößerte sich im Verlauf der Einspritzung. Wurden Druck und Temperatur so variiert, dass die Dichte konstant blieb, zeigten sich gleichartige Einblasecharakteristika; auch das Kegelwinkelverhalten blieb relativ zueinander konstant.

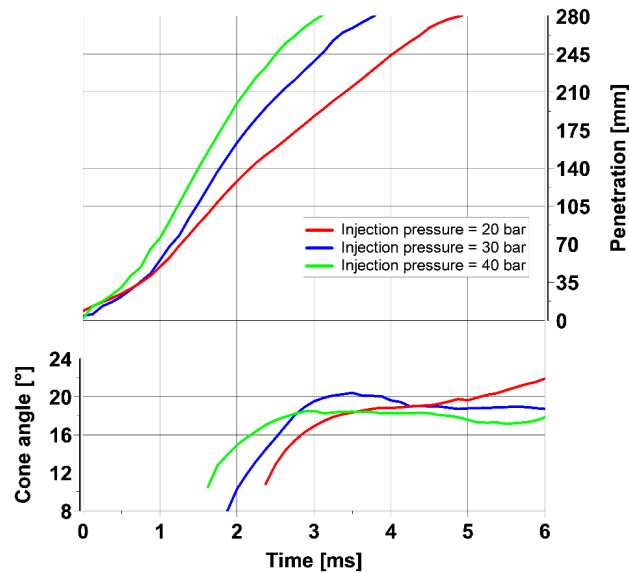


Abbildung 71: Systematische Auswertung der Sprayparameter in Form von Eindringtiefe und Ausbreitungswinkel

Zusätzliche visuelle Untersuchungen

Zur Strömungsphänomenologie wurden der Coandă-Effekt dokumentiert und Streulichtaufnahmen genutzt, um eine evtl. durch Expansion hervorgerufene, kurzzeitige Verflüssigung des Gases in Düsennähe nachzuweisen. Diese Beobachtungen ergänzen die Schlierenanalysen um Hinweise auf lokale Phasenübergänge und Wandnäheeffekte.

Validierung des Simulationsmodells

Anhand der Messungen konnten die Simulationsmodelle validiert werden. Ein Vergleich der gemessenen und simulierten Eindringtiefe gibt Abbildung 72.

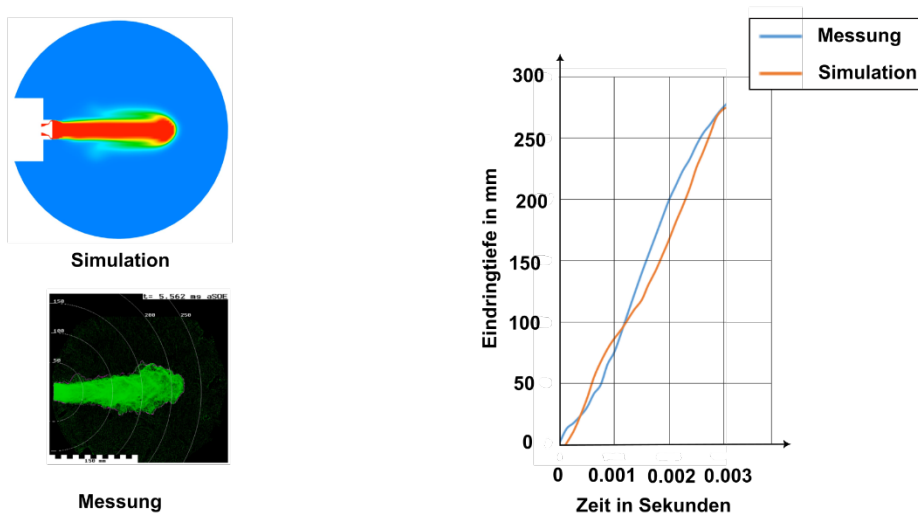


Abbildung 72: Vergleich der Eindringtiefe und Form der Eindüsung, Simulation vs. HD-HT Kammer

Hier werden Form und Eindringtiefe des strahlförmigen Gasjets gut wiedergegeben. Leichte Abweichungen sind aufgrund von Vereinfachungen bei der Modellierung entstanden, z.B. die fehlende Strömung in der Kammer und die Modellierung der Kraftstoffeindüsung ohne einen bewegten Injektornadel. Nichtsdestotrotz spricht die gute Übereinstimmung von Simulation und Messung für eine hohe Güte der Simulation. Ohne die Versuche am Hochdruck-Hochtemperatur Einspritzkammer wäre diese Sicherheit nicht gegeben.

Zusammenfassung

Mit den dargestellten Entwicklungen, Messstrategien und Ergebnissen liegt ein umfassend charakterisiertes gasbasiertes Direkteinblassystem für Mitteldruck- und Hochdruckanwendungen vor, dessen Eigenschaften sowohl hinsichtlich der systeminternen Dynamik als auch der Sprayentwicklung unter realitätsnahen Brennraumzuständen verifiziert wurden. Die Befunde zur Verrohrung und zum Druckniveau verdeutlichen den maßgeblichen Einfluss der Gasbereitstellung auf Reproduzierbarkeit, Dynamik und Güte der Einblasevorgänge und liefern damit die Grundlage für die weitere Optimierung des Dual-Fuel-Brennverfahrens. Die Komponentenuntersuchungen haben maßgeblich zur Validierung der Simulation und damit zum Erfolg der Brennverfahrensentwicklung mit DI-Verfahren beigetragen. Des Weiteren waren insbesondere die EVI-Messungen unerlässlich für die Motorversuche mit den HD-Injektoren.

Experimentelle Untersuchungen am Einzylindermotor

Aufbau HD-Gas-Infrastruktur / Steuerung, Regelung, Sicherheitskonzept

Für die Untersuchungen mit Gasdirekteinblasung am Einzylinder-Forschungsmotor musste ebenfalls die MD & HD Gasversorgung realisiert werden. Die vorhandene Gasinfrastruktur bestehend aus Vorverdichter (17 bar) und Gasmischanlage wurde um einen HD-Brenngasverdichter für die Versorgung mit bis zu 500 bar Gasdruck erweitert. Der HD-Brenngasverdichter wurde als zweiteilige Anlage ausgeführt, bei der zunächst über einen Kolbenkompressor eine Zwischendruckerhöhung stattfindet. Anschließend wird das Brenngas in einen elektrohydraulisch angetriebenen Druckübersetzer auf den finalen Druck verdichtet. Die Anlage ist dabei in der Lage eine Vielzahl von Gasgemischen, unter anderem auch 30 vol.-% Wasserstoff zu verdichten. Neben der Zumischung kann auch reiner Wasserstoff verdichtet werden, wobei dessen darstellbarer Volumenstrom beim aktuell verwendeten Versuchsträger aber nur für die untere Teillast reichen wird.



Abbildung 73: HD-Brenngasverdichter (l.) und Druckregelstrecke im Prüfstand (r.)

Innerhalb der Prüfstandkabine wird das Brenngas dann über eine Druckregelstrecke geleitet. Hier erfolgen Druck- und Temperaturmessungen, Messung des Massenstromes, Abnahme einer Kleinmenge zur Gasanalyse über Erdgas- und Wasserstoffgaschromatograph, Feindruckregelung und eine notwendige Sicherheitsabschaltung im NA-Fall. Aufgrund des Prototypencharakters der Gas-DI Injektoren ist die Sicherheitsschaltung zusätzlich an ECU bzw. Indiziersystem gekoppelt, sodass beispielsweise ein Klemmen der Injektornadel detektiert und die Gaszufuhr entsprechend unterbrochen werden kann. Die Einbausituation der DI-Gasinjektoren wurde gemeinsam mit Caterpillar und DUAP AG definiert. Diese berücksichtigt im Rahmen des Sicherheitskonzepts am Forschungsmotor mehrere Positionen zur Leckageüberwachung via Drucksensoren.

Messstrategien / Ergebnisse

Angelehnt an die experimentellen Untersuchungen im Rahmen der Basisvermessung und der Einzelmaßnahmen im Niederdruck-Brennverfahren wurde das Messprogramm für das MD-Brennverfahren definiert. Gegenüber dem ND-Brennverfahren gewinnen die Parameter der Gaseinbringung (Einblasezeitpunkt, & -druck) an Bedeutung, entsprechend wurden Untersuchungen zu diesen Parametern mit in die Versuchsmatrix aufgenommen.

Die folgenden Betriebsparameter lagen bei den Untersuchungen am Motor im Fokus:

Tabelle 12: Motorbetriebsparameter im Fokus der experimentellen Versuche am Einzylindermotor

System	Parameter
Brenngas	Gasdruck (Ansteuerdauer)
	Einblasezeitpunkt
	Mehrfacheinblasung
Luftsystem	Ladeluftdruck (Luftverhältnis)
Pilotkraftstoffsystem	Pilotmenge
	Piloteinspritzzeitpunkt (Schwerpunktlage der Verbrennung)
Hardwaresetup	Kolbenmuldengeometrie
	Injektorstrahlführung Verdichtungsverhältnis

Simulationsgestützt wurden für das MD-Brennverfahren zwei Betriebsstrategien vordefiniert und entsprechende Betriebsparameter eingegrenzt:

- MD-Homogenbrennverfahren (MD-H)
 - o Standard Kolbengeometrie
 - o Injektor ohne Strahlführung (Stichversuche auch mit Strahlführung)
 - o Frühe Gaseinblasung
- MD-Schichtladungsbrennverfahren (MD-SL)
 - o Kolbengeometrie mit ausgeprägter Kolbenmulde
 - o Injektor mit Strahlführung
 - o Späte Gaseinblasung

Mithilfe von Validierungsmessungen wurden die Ergebnisse der CFD-Simulation gegengeprüft und konnten grundsätzlich bestätigt werden.

MD-Homogenbrennverfahren (MD-H)

Die Inbetriebnahme des vollständigen Systems (Gasversorgung, MD Injektoren) erfolgte im Homogenbrennverfahren, da hier eine hohe Vergleichbarkeit der Zusammenhänge mit dem ND-Brennverfahren erwartet wurde. Entsprechend der CFD Simulation wurden die Betriebsparameter entsprechend definiert und anschließend variiert, um die Simulationen validieren zu können. Mithilfe der Komponentenuntersuchungen am EVI konnte außerdem die entsprechend des eingestellten Gasdrucks benötigte Ansteuerdauer des Injektors vordefiniert werden. Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden bereits im Rahmen mehrerer Tagungsbeiträge veröffentlicht. Ausgewählte Erkenntnisse kurz zusammengefasst:

- Gaseinblasezeitpunkt: frühe, saugsynchrone Einblasezeitpunkte optimal für ausreichende Homogenisierung im Brennraum konnte bestätigt werden, 320 °KWvOT als Basis-Setup für folgende Versuche definiert.
- Gasdruck: für ausreichende Homogenisierung und eine gute Fahrbarkeit ist ein niedriger Gasdruck und damit eine lange Gaseinblasung förderlich. Ca. 40 bar Gasdruck reichten für den Vollastbetrieb aus, bei niedrigeren Lastpunkten konnte der Gasdruck weiter abgesenkt werden. Die verhältnismäßig niedrigen Gasdrücke wirken sich positiv auf eine den Gesamtwirkungsgrad in einer potenziellen Schiffsanwendung aus: 40 bar könnten potenziell ohne zusätzlichen Verdichter, sondern rein durch Erwärmung des LNGs erzielt werden (vgl. folgende Abbildung: kritischer Druck = 46 bar; Verdampfer & Kraftstoffsystem müssten entsprechend ausgelegt sein).

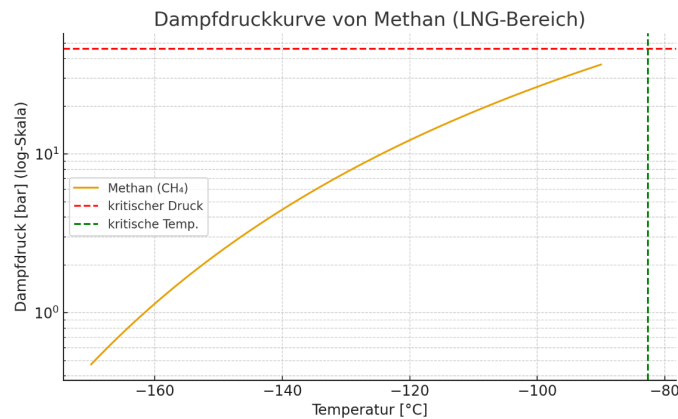


Abbildung 74: Dampfdruckkurve von Methan stellvertretend für LNG mit Markierung für den kritischen Punkt (-82,6 °C; 46 bar)

- Ladeluftdruck/Luftverhältnis: durch die gute Homogenisierung mit frühen Einblasezeitpunkten läuft die Verbrennung vergleichbar zum ND-Brennverfahren ab (vorgemischtes Erdgas-/Luft-Gemisch, DF-typische, frühe Piloteinspritzung mit langen Zündverzügen). Entsprechend konnten grundlegende Erkenntnisse über den Einfluss des Luftverhältnisses übertragen werden, was die Parametrierung und Motorabstimmung erleichterte.
- Luftverdrängung: die innere Gemischbildung wirkt sich auf die Luftverdrängung aus (weniger Luftverdrängung als bei äußerer Gemischbildung). Dies wirkt sich einerseits auf das Luftverhältnis aus (gleicher Ladedruck führt bei MD zu geringfügig höheren Lambda-Werten, was sich wiederum auf NOX/CH4 auswirkt), was den direkten Vergleich zwischen ND/MD betrifft. Des Weiteren kann dadurch potenziell die Leistung im Gasbetrieb erhöht werden, da mehr Frischluft in den Brennraum strömt und damit mehr Kraftstoff bei gleichem Lambda eingebracht werden kann.
- Piloteinspritzsystem: aufgrund der Ähnlichkeit ND/MD-H große Übertragbarkeit und keine signifikant neuen Erkenntnisse. Vorteilhaft für Übertragung von Regelungskonzepten.
- Hardwarekonfiguration: Für den Homogenbetrieb eignet sich das Standard-Kolbenmuldendesign sehr gut. Dies ist vorteilhaft in Bezug auf die Neukonstruktion als auch die Umrüstung von DF-Motoren. Bezüglich der Injektorstrahlführung konnten sowohl mit als auch ohne Strahlführung ein vergleichbarer Motorbetrieb realisiert werden. Dies wirkt sich positiv auf die Flexibilität aus.

MD-Schichtladungsbrennverfahren (MD-SL)

Nachdem ausreichend Erfahrungen im MD-H Brennverfahren gesammelt, und die Voruntersuchungen (CFD, EVI, HDHT Kammer) durchgeführt wurden, wurden Versuche für die Realisierung eines Schichtladungsbrennverfahrens durchgeführt. Dafür wurde das neue Kolbenoberteil und die Injektorstrahlführung eingebaut. Im Gegensatz zum MD-H Brennverfahren, bei dem die Parameter der Gaseinblasung in einem relativ weiten Bereich eingestellt werden können, spielt die Gaseinblasung im MD-SL Brennverfahren eine wesentlich stärkere Rolle bei der Gemischverteilung im Brennraum. Entsprechend wurden dafür umfangreiche Versuche bezüglich Einblasezeitpunkt und Gasdruck durchgeführt. Ausgewählte Variationen des Gaseinblasezeitpunkts (Bestromungsbeginn) sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

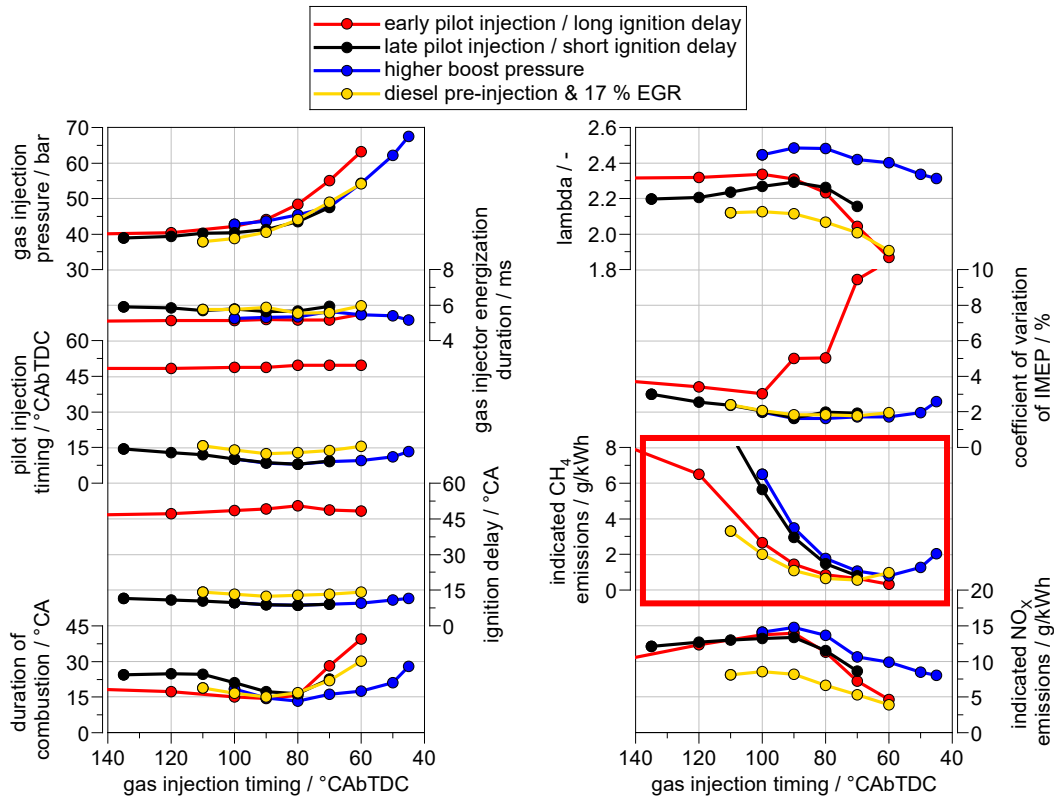


Abbildung 75: Variationen des Einblastimings bei 50 % Motorlast

Daraus abgeleitete Erkenntnisse: die frühen, für DF-Motoren typischen Piloteinspritzzeitpunkte (Messreihe in rot dargestellt) führen bei späten Gaseinblasezeitpunkten zu niedrigen CH₄ Emissionen, allerdings auch zu einer enorm instabilen Verbrennung (hoher COV). Eine spätere Piloteinspritzung (Diesel-typische Diffusionsverbrennung, Messreihe in schwarz dargestellt) erhöhte die Verbrennungsstabilität, jedoch lagen die CH₄ Emissionen insbesondere bei frühen Gaseinblasezeitpunkten höher. Bei späten Gaseinblasezeitpunkten und damit niedrigen CH₄ Emissionen war jedoch eine Verlängerung der Brenndauer zu erkennen (→ sinkender Wirkungsgrad, hohe Abgastemperaturen). Der Einfluss des Gaseinblasezeitpunkts auf die CH₄ Emissionen konnte mithilfe der CFD-Simulation erklärt werden: bei zu frühen Gaseinblasungen strömt zu viel Gas aus der Kolbenmulde hinaus, bei zu späten Gaseinblasezeitpunkten wird zu wenig Luft/Sauerstoff mit in den Gasjet eingezogen.

Mit einem höheren Ladedruck (Messreihe in blau dargestellt) konnte aufgrund des höheren Sauerstoffangebots der fahrbare Betriebsbereich weiter in Richtung später Gaseinblasezeitpunkte verschoben werden.

Die frühen Piloteinspritzzeitpunkte der ersten Messreihe wirkten sich positiv auf die CH₄ Emissionen aus, da der Diesel durch die frühe Piloteinspritzung bis zum Brennbeginn bereits teilhomogenisiert im Brennraum ist. Dadurch wird insbesondere das Erdgas, welches sich in den Randbereichen außerhalb der Kolbenmulde befindet, vom Diesel erfasst und zu einem Großteil umgesetzt. Um die CH₄-Vorteile des teilhomogenisierten Diesels bei früher Piloteinspritzung mit der stabilen Verbrennung bei späten Piloteinspritzzeitpunkten zu kombinieren, wurde eine Pilot-Mehrfacheinspritzungsstrategie untersucht. Des Weiteren wurde AGR hinzugefügt, um die NO_x Emissionen zu senken (Messreihe mit Diesel-Voreinspritzung und AGR in gelb dargestellt).

Insgesamt hat sich ein Bereich von ca. 60-80 °KWvOT als Einblasezeitpunkt als Optimum herausgestellt, wie bereits durch die CFD Simulation näherungsweise abgeschätzt werden konnte. Dabei wurden die geringsten CH₄ Emissionen tendenziell bei späteren Gaseinblasezeitpunkten gemessen, während bei frühen Gaseinblasezeitpunkten ein höherer Wirkungsgrad und damit niedrigere CO₂ Emissionen auftraten.

Entsprechend des infolge der Kompression steigenden Zylinderdrucks wurde während dieser Messreihen auch der Gasdruck mit angehoben, um die Dauer der Gaseinblasung nahezu konstant zu halten. Dadurch waren in diesem Beispiel bis knapp unter 70 bar Gasdruck erforderlich. Um den Einfluss des Gasdrucks separat zu betrachten wurden Gasdruckvariationen bei verschiedenen Einblasezeitpunkten gefahren, wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist. Diese verdeutlichen den Zusammenhang von Brenndauer/Wirkungsgrad/CO₂/CH₄ Emissionen sehr gut. Bei 80 °KW konnten die kürzesten Brenndauern, und damit auch die höchsten Wirkungsgrade und

dementsprechend niedrigsten CO₂ Emissionen nachgewiesen werden. Allerdings waren durch das Ausströmen von Brenngas aus der Kolbenmulde leicht erhöhte CH₄ Werte zu beobachten. Mit steigendem Gasdruck konnte der Wirkungsgrad erhöht werden, allerdings stiegen die CH₄ Emissionen dadurch weiter an. Es konnte also ein Zielkonflikt zwischen niedrigen CO₂ und niedrigen CH₄ Emissionen beobachtet werden. Die niedrigsten gesamt-THG-Emissionen traten je nach Gewichtungsfaktor für Methan bei 60 oder 70 °KWvOT Einblasezeitpunkt auf. Um die THG Emissionen weiter zu senken können nun also weitere Maßnahmen getroffen werden, um entweder CO₂ oder CH₄ Emissionen zu senken. Um die CO₂ Emissionen zu senken, konnte als essenzieller Parameter das Luftverhältnis festgestellt werden. Durch ein höheres Luftverhältnis steht mehr Sauerstoff zur Verfügung, sodass die Brennauer verkürzt wird und der Wirkungsgrad steigt. Unter Betrachtung bestehender Turboladerkonzepte ist der Betriebsbereich diesbezüglich allerdings begrenzt. Als wesentlich einfacheres Mittel stellte sich die Piloteinspritzstrategie mit Voreinspritzung zur Senkung der CH₄ Emissionen heraus. Entsprechend wurde aus den dargestellten Versuchsreihen der Betriebspunkt mit dem besten Wirkungsgrad als Basis für die optimierte Piloteinspritzstrategie ausgewählt (in grün dargestellt). Dadurch konnte der Methanschlepp um ca. 50 % reduziert, der Wirkungsgrad um ca. 1 Prozentpunkt angehoben und die THG Emissionen auf den Minimalwert innerhalb dieser Messkampagne reduziert werden.

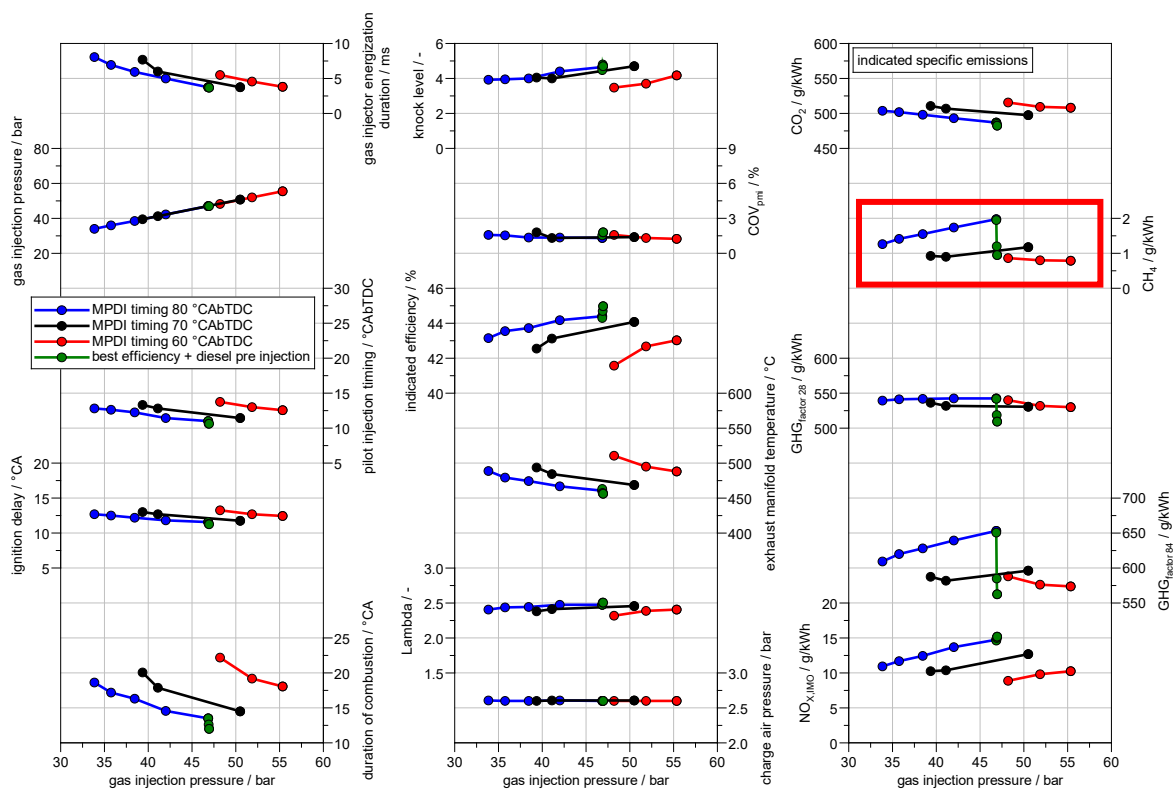


Abbildung 76: Analyse zum Einfluss des Gasdrucks bei MD-SL bei 50 % Motorlast

Vergleich ND vs. MD-H vs. MD-SL

Nachdem die unterschiedlichen Brennverfahren für sich betrachtet jeweils untersucht wurden, erfolgte als nächstes eine direkte Gegenüberstellung. Die folgende Abbildung zeigt das Prinzip der jeweiligen Brennverfahren anhand von Zylinderdrucksignal, Heizverlauf und der Bestromungssignale der einzelnen Kraftstoffe. Dabei werden zu vorherigen Beobachtungen gut dargestellt: ND & MD-H gleichen sich bis auf das Ansteuersignal des Gasinjektors sehr stark. Bei MD-SL fällt der insgesamt höhere Zylinderdruck auf. Das liegt zum einen an dem höheren Ladedruck, der für das Brennverfahren erforderlich ist. Außerdem steigt der Zylinderdruck infolge der viel schnelleren Verbrennung stärker an. D.h. ein für Schichtladung konzipierter Motor müsste höhere Spitzendrücke zulassen. In der hier untersuchten Teillast ist das unproblematisch, da genügend Abstand zur Belastungsgrenze vorhanden ist. In der Vollast kann dies zu Einschränkungen des Schichtladungsbetriebs führen.

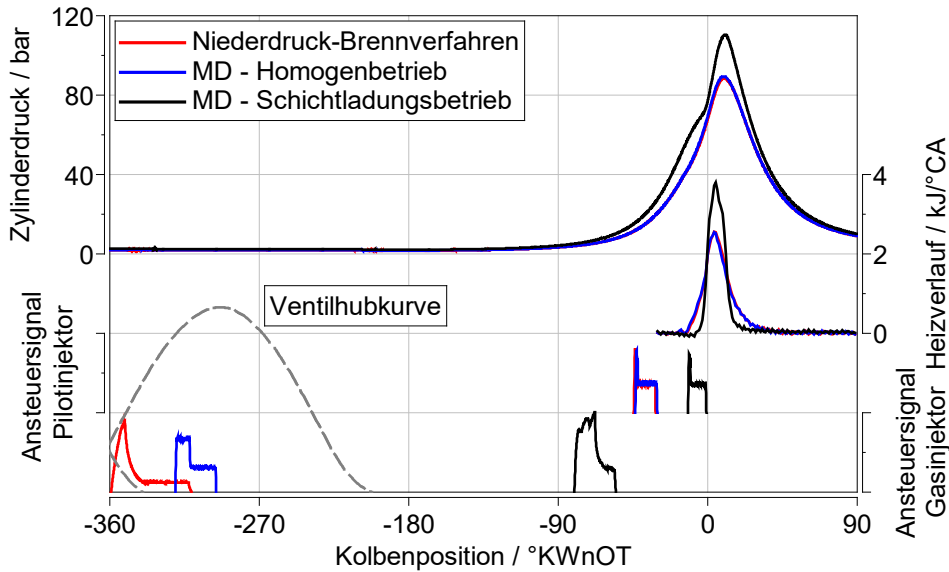


Abbildung 77: Vergleich der verschiedenen Brennverfahren ND, MD-H und MD-SL bei 50 % Last

Die Gegenüberstellung der Brennverfahren in Bezug auf die Emissionen erfolgt anhand von repräsentativen Variationen des Luftverhältnisses in der folgenden Abbildung.

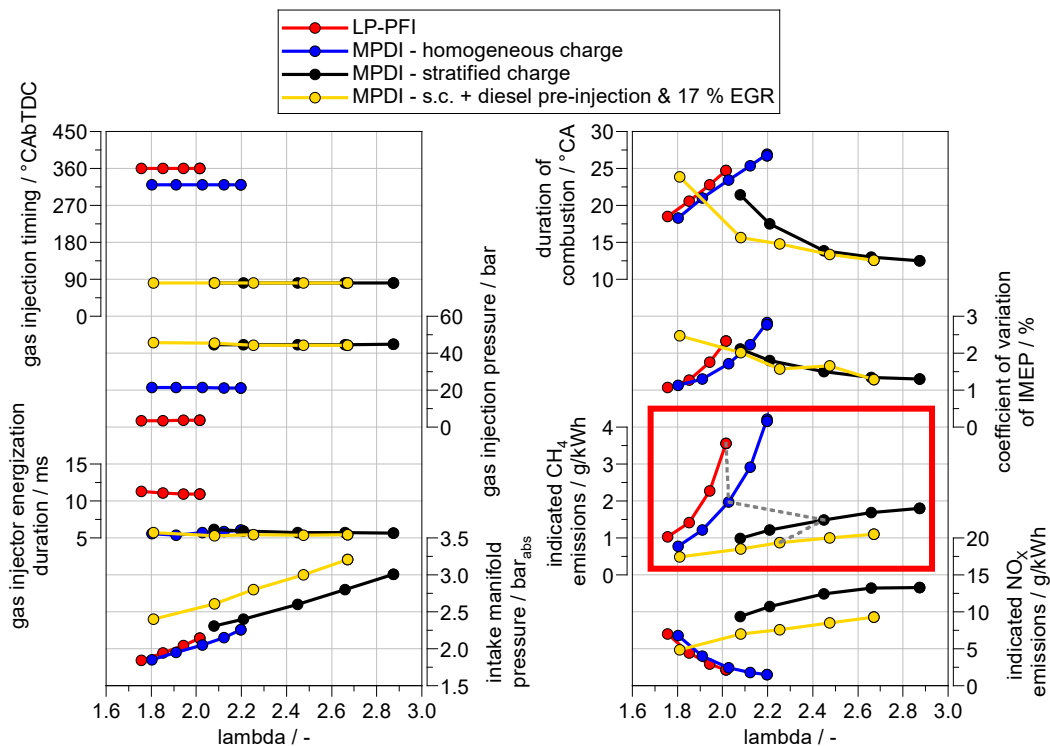


Abbildung 78: Vergleich der unterschiedlichen Brennverfahren ND, MD-H & MD-SL anhand von Lambdavariationen bei 50 % Last. In grau gepunktet im Diagramm CH₄ sind die Basis-Messpunkte für den Vergleich in der kommenden Abbildung kenntlich gemacht.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Gemischverteilung innerhalb des Brennraums ist ein direkter Vergleich bei gleichem Lambda nicht sinnvoll. Für den Vergleich der THG Emissionen in Abbildung 79 wurde aus den in Abbildung 78 dargestellten Messreihen jeweils ein Messpunkt ausgewählt. Für die beiden Homogenbrennverfahren ND und MD-H wurde sich auf einen Vergleich bei konstantem Lambda von ca. 2 festgelegt. In diesen Punkten liegen bei beiden Messreihen die NO_x Emissionen etwa auf Höhe des IMO Tier 3 Grenzwerts (bei MD-H geringfügig höher). Für die Schichtladung wurden aus den beiden Messreihen (Basis und emissions-optimiert) jeweils die mittleren Messpunkte als Kompromiss zwischen kurzen Brenndauern und niedrigen CH₄ Emissionen ausgewählt.

Dies führt zu den hervorgehobenen prozentualen Reduzierungen der CH₄ bzw. THG Emissionen in den folgenden Diagrammen.

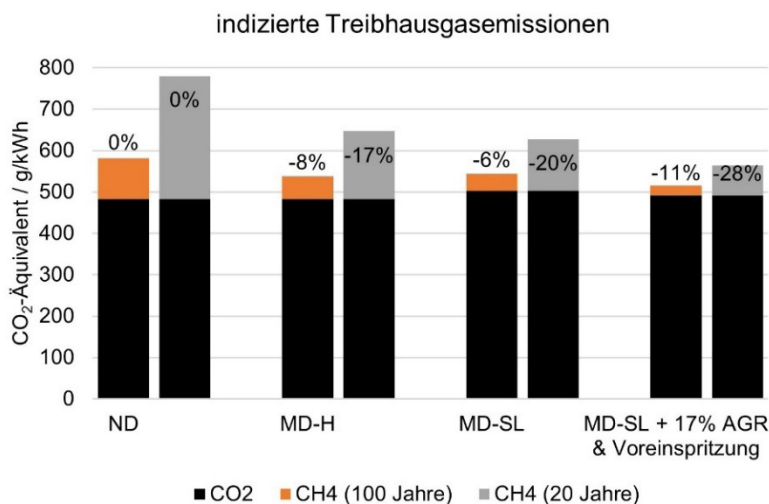
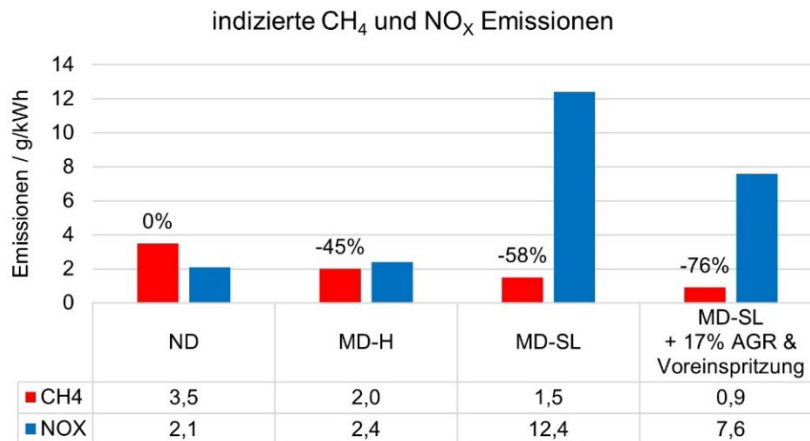


Abbildung 79: Vergleich der THG-Emissionen der verschiedenen Brennverfahren ND, MD-H & MD-SL

Es kann also festgehalten werden, dass mit dem MD-H Brennverfahren gegenüber dem ND-Brennverfahren als Vergleichsbasis die CH₄ Emissionen bei konstanten CO₂ Emissionen signifikant reduziert werden können. Die CH₄ Emissionen können durch Verwendung eines Schichtladungsbrennverfahrens weiter gesenkt werden. Durch dabei allerdings leicht erhöhte CO₂ Emissionen ist erst durch weitere Optimierungsmaßnahmen, in diesem Fall AGR (primär zur NO_x Reduzierung) und Voreinspritzung (zur CH₄ Reduzierung), ein signifikanter Mehrwert in den gesamt-THG-Emissionen festzustellen.

Der Aufwand, um diesen zusätzlichen CH₄ Vorteil im Schichtladungsbrennverfahren zu erreichen, ist also deutlich erhöht:

- Angepasstes Hardwaresetup (Kolbengeometrie, Injektorstrahlführung)
- Kompliziertere Parametrierung der Gaseinblasung (Brennverfahren reagiert sensibel auf Änderungen der Gaseinblasung)
- Parametrierung der Piloteinspritzung: Viel spätere Zündinspritzung (Anpassung Regelungskonzept auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt); Diesel-Voreinspritzung
- Höhere Ladedrücke erforderlich (eventuell Anpassung der Aufladegruppe)
- Höherer Gasdruck erforderlich (Gasverdichter erforderlich)

Des Weiteren stellen die erhöhten NO_x Emissionen eine Herausforderung dar. Diesen konnte erfolgreich mit AGR entgegengewirkt werden, allerdings sind für ein Erreichen des IMO Tier III Grenzwerts höhere AGR Raten oder eine geeignete Abgasnachbehandlung (SCR) erforderlich.

Durch die Komplexität des Schichtladungsbrennverfahrens kann allerdings auch noch von weiterem Entwicklungspotenzial ausgegangen werden. Während das MD-H Brennverfahren von der Ähnlichkeit zum ND-Brennverfahren und dessen jahrelanger Entwicklungs-/Optimierungszeit profitiert, wurde das MD-SL Brennverfahren im Rahmen des Projekts TEME2030+ komplett neu entwickelt. Für zukünftige Entwicklungen müssen Wirkungsgradsteigernde Maßnahmen im Fokus liegen, um vergleichbare CO₂ Emissionen wie im Homogenbrennverfahren erreichen zu können. Dann kann das Potenzial der reduzierten CH₄ Emissionen durch gezielte Ladungsschichtung und Fernhalten von den kalten Brennraumwänden voll ausgeschöpft werden.

Weitere, detailliertere Ergebnisse wurden bereits im Rahmen diverser Tagungsbeiträge veröffentlicht und sind Teil zukünftig geplanter Veröffentlichungen sowie Promotionen.

HD-Brennverfahren

Im Rahmen der dritten Säule des Projekts TEME2030+ stand die Entwicklung eines Brennverfahrens mit Hochdruck-Direktinblasung. Damit sollte ein diffusives Brennverfahren realisiert werden, mit dem die CH₄-Vorteile, die bereits MD-H/MD-SL mit sich bringen (kein Überströmen während der Ventilüberschneidung, keine Flammlöschung durch kalte Brennraumwände oder Flame Quenching), erhalten bleiben, und zusätzlich der Wirkungsgrad durch die eliminierte Einschränkung durch klopfende Verbrennung angehoben werden kann. Dafür muss die Gaseinblasung gegen Ende des Kompressionstakts kurz vor dem oberen Totpunkt erfolgen.

Mithilfe der Erkenntnisse vom EVI (reale Gaseinblasung deutlich später und länger als das eigentliche Bestromungssignal des Injektors) konnte dies am Einzylindermotor umgesetzt werden. Auffällig dabei war, dass der Gasinjektor deutlich vor dem Pilotinjektor angesteuert werden musste. Dies lag an der Trägheit des nach außen öffnenden Gasinjektors und der damit einhergehenden langen Öffnungs- und Schließverzögerungen. Für das Erreichen eines höheren Lastpunkts (z.B. 50 % bzw. $p_{mi} = 10,8$ bar) konnte entweder die Öffnungsdauer oder der Gasdruck Lastanhebung gesteigert werden. Die folgende Abbildung zeigt zwei Parametervariationen mit einer Anhebung der Motorlast.

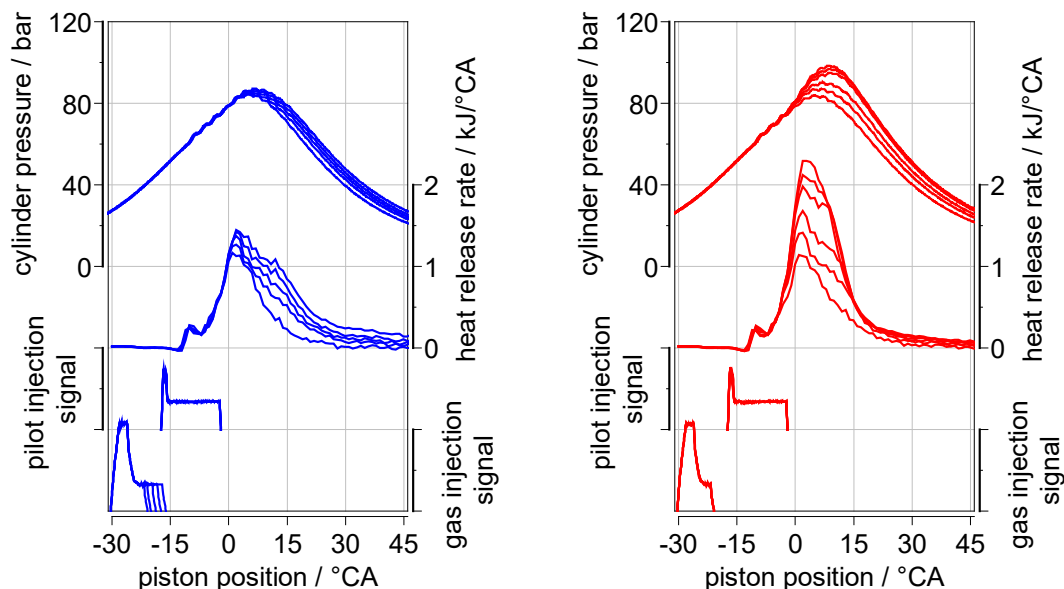


Abbildung 80: Erhöhung der Ansteuerdauer des HD-Injektors (l.) bzw. des Gasdrucks (r.) zur Anhebung der Motorlast

Die folgende Abbildung zeigt ausgewählte Ergebnisse der entsprechenden Parametervariationen der vorherigen Abbildung.

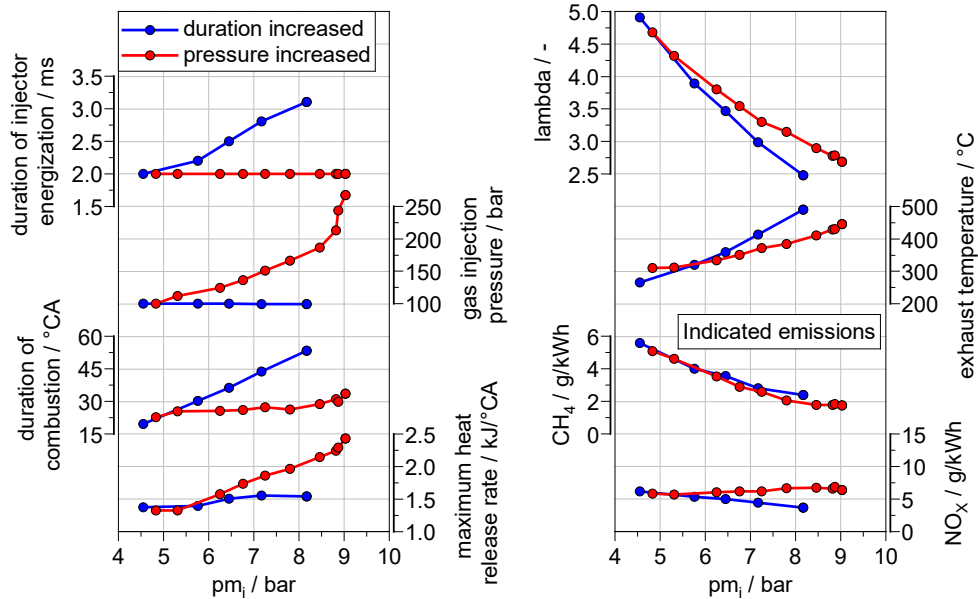


Abbildung 81: Resultate der beiden Parametervariationen aus Abbildung 80 über den indizierten Mitteldruck stellvertretend für die Motorlast dargestellt.

Ausgewählte Erkenntnisse aus den gezeigten Abbildungen/Parametervariationen:

- Diffusives Brennverfahren erfolgreich appliziert
 - o Druckerhöhung führt zu erhöhter Einblasrate und damit deutlich steigender maximaler Umsatzrate
 - o Längere Ansteuerdauer führt zu längerer Brenndauer bei vergleichbaren maximalen Umsatzraten
- Lastanhebung durch Erhöhung des Gasdrucks vorteilhaft gegenüber längerer Öffnungsdauer: niedrigere Abgastemperaturen und kürzere Brenndauern.
- Brenndauer korreliert zwar mit der Ansteuerdauer, ist jedoch deutlich länger als die Ansteuerdauer des Gasinjektors (1 ms = 4,3 °KW): bestätigt Beobachtungen am EVI

Im Verlauf der Untersuchungen wurden weitere solcher Last-Variationen durchgeführt (Abbildung 82). Mit einem angepassten Gaseinblasezeitpunkt konnte die Last weiter angehoben werden und der Motor weitestgehend stabil und reproduzierbar betrieben werden. Bei etwa 50 % Motorlast (10,8 bar p_{mi}) konnten die CH₄ Emissionen so auf den Zielwert von <1 g/kWh gesenkt werden.

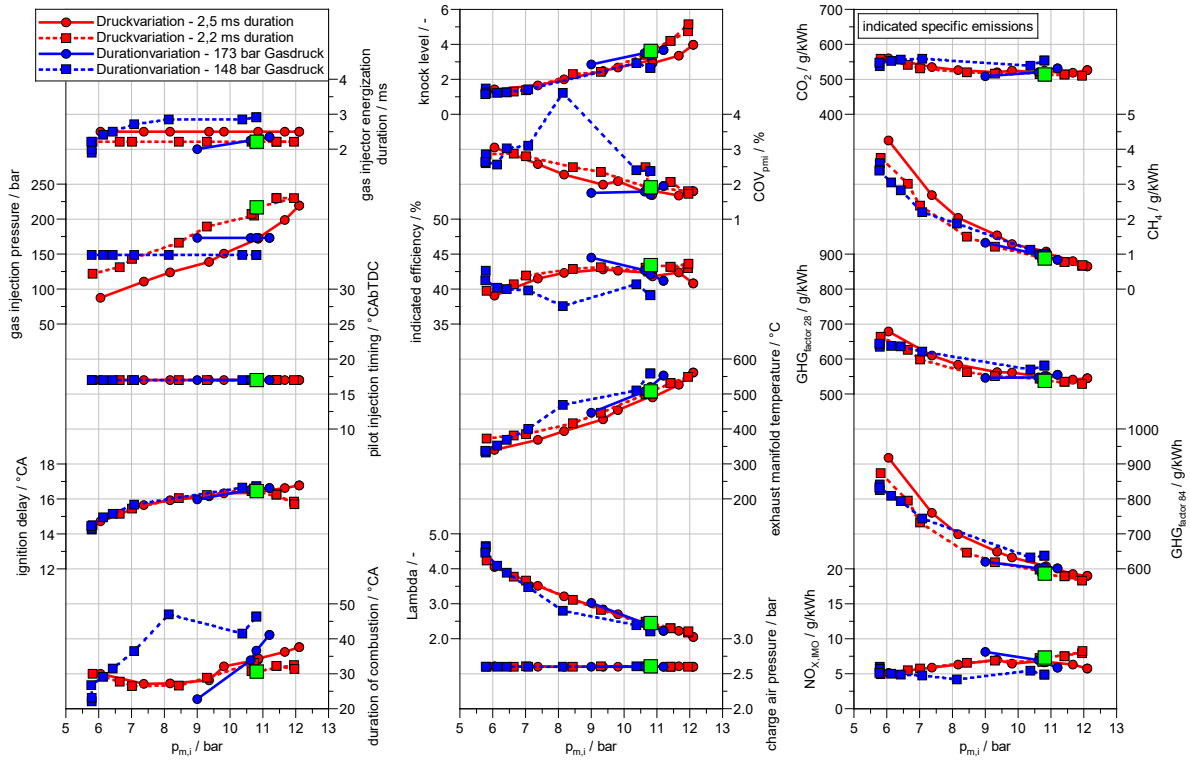
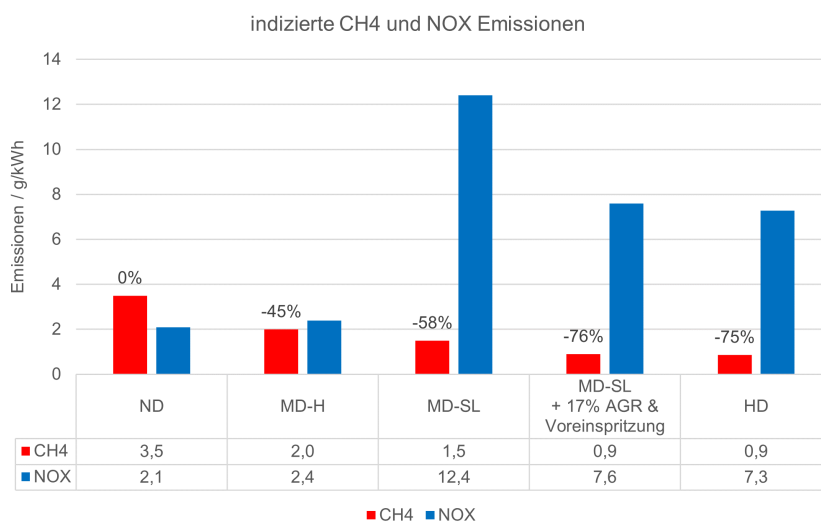


Abbildung 82: Lastvariationen im HD-Brennverfahren von ca. 20 % bis 60 % Motorlast ausgewählter Betriebspunkt bei 50 % Last (grün) für den folgenden Vergleich der unterschiedlichen Brennverfahren

Aufgrund eines geringen Wirkungsgrads lagen die CO₂ Emissionen allerdings über den Werten der vorherigen Brennverfahren. Auf 20 Jahre (CH₄ Faktor 84) gerechnet liegen die THG Emissionen aufgrund des niedrigen CH₄ Werts dennoch unter den Brennverfahren ND / MD-H / MD-SL (ohne optimierte Betriebsstrategie). Lediglich mit dem emissionsoptimierten Schichtladungsbrennverfahren konnte ein noch besserer Wert erreicht werden. Bei einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren (Faktor 28) wurden aufgrund der stärkeren Gewichtung der CO₂ Emissionen auch mit dem MD-H Brennverfahren vergleichbar niedrige THG Emissionen wie im HD-Brennverfahren erreicht, jedoch liegt auch hier MD-SL+AGR&VE auf einem noch niedrigeren Niveau.



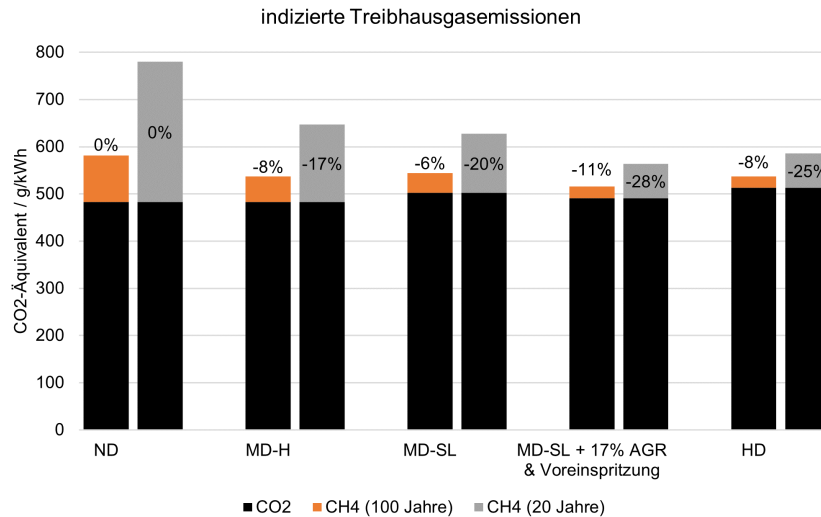


Abbildung 83: Vergleich der CH4/NOX/THG Emissionen der verschiedenen Brennverfahren bei 50 % Last

Das CH4-Minderungspotenzial eines diffusiven Brennverfahrens mit HD-Gasdirektinblasung konnte innerhalb des Projekts TEME2030+ erfolgreich nachgewiesen und quantifiziert werden. Aufgrund eines vergleichsweise geringen Wirkungsgrads gegenüber den anderen Brennverfahren ND / MD-H / MD-SL konnten die gesamt-THG-Emissionen jedoch nicht weiter gesenkt werden.

Um das volle Potenzial eines HD-Brennverfahrens auszuschöpfen müssten also wirkungsgradsteigernde Maßnahmen ergriffen werden. Aufgrund der Verdichtung von reiner Luft kann es prinzipbedingt nicht zu klopfender Verbrennung kommen. Im Betrieb kam es jedoch dennoch zu leicht erhöhten Klopfwerten. Auf Basis der Klopfuntersuchungen im Rahmen der Entwicklung des Regelungskonzepts für variierende Gaszusammensetzungen konnte dies jedoch auf die Dieselvebrennung als Ursache zurückgeführt werden. Eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses ohne Klopfgefahr eröffnet also die Möglichkeit zur Steigerung des Wirkungsgrades. Die gezeigten Ergebnisse des HD-Brennverfahrens wurden aus Gründen der direkten Vergleichbarkeit beim gleichen Verdichtungsverhältnis von 13,15 gemessen.



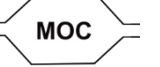
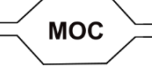


Des Weiteren kann mit der Optimierung des Gasinjektors (bzw. der Ansteuerung) möglicherweise noch zusätzliches Potenzial erschöpft werden. Die kurzen Ansteuerdauern und die hohe Trägheit des Injektors führten zu einer komplizierten Parametrierung des Steuergeräts. Die Verwendung von Helium statt Stickstoff als Steuergas würde eine bessere Dynamik ermöglichen.

Auf Basis der gemessenen Ergebnisse konnten mit dem HD-Brennverfahren also noch keine ausreichende THG-Reduzierung erreicht werden, um die stark erhöhten Kosten (Verdichter, Rohrleitung, Injektor, ...) und den Energieaufwand für die Druckerzeugung zu rechtfertigen.

2.1.14 AP 8: Entwicklung Übertragbarkeitskonzept auf Serienanwendung

Ein Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung von Abgasnachbehandlungskonzepten für die unterschiedlichen Brennverfahren. Mit dem heute etablierten Niederdruckverfahren können die IMO Tier III NO_x-Grenzwerte bereits ohne AGN erreicht werden. Um jedoch minimale Treibhausgasemissionen zu erreichen wäre ein Methan-Oxidations-Katalysator förderlich. Zum Berichtszeitpunkt ist noch kein serientauglicher, dauerhaltbarer MOC auf dem Markt. Das MD-Homogen Brennverfahren ist dem ND-Verfahren sehr ähnlich, daher stimmt auch das Abgasnachbehandlungskonzept überein. Bei der MD-Schichtladung entstehen zusätzlich Stickoxide (NO_x), die mithilfe eines SCR-Katalysators reduziert werden sollten, sofern beispielsweise eine innermotorische Reduzierung durch AGR nicht ausreicht. Durch die niedrigen Methanschleppwerte bei MD-SL wird kein MOC benötigt, jedoch wäre dies eine Möglichkeit, die Emissionen noch weiter zu senken. Beim HD-Verfahren entstehen erhöhte Stickoxide, die mithilfe des SCR-Katalysators oder innermotorisch durch AGR reduziert werden sollten. Unter Berücksichtigung einer guten Ausnutzung des Entwicklungspotenzials ist von sehr geringen CH₄ Emissionen auszugehen, sodass kein MOC benötigt wird. Eine Übersicht liefert die folgende Tabelle.

Tabelle 13: Möglichkeiten der Abgasnachbehandlung der verschiedenen Brennverfahren

Emissionsziel	ND	MD-Homogen	MD-Schichtladung	HD
IMO Tier III	-	-		
Minimale THG	 *	 *	 *	

*MOC noch nicht verfügbar

Ein weiteres Ziel war die Erarbeitung von Bewertungskriterien für den Vergleich der unterschiedlichen Technologiekonzepte. Die folgende Tabelle gibt zunächst einen Überblick über die erforderlichen Anpassungen für die jeweilige Technologie, außerdem erfolgt eine Bewertung anhand eines Punktesystems (1 = schlecht, 5 = gut). Weitere Details zur Bewertung der einzelnen TKs finden sich in den Potenzialanalysen im nächsten Kapitel (AP 9).

Tabelle 14: Vergleich der einzelnen Technologiekonzepte in Bezug auf den Anpassungsaufwand einzelner Teilsysteme des Motors und Bewertung anhand eines Punktesystems von 1 bis 5 (1 = schlecht, 5 = gut)

erforderliche Anpassungen		VCR	MOC	AGR	HVO	H2	MD-H	MD-SL	HD
Ladeluftsystem		—	—	✓	—	—	—	—	—
Zylinderkopf		—	—	—	—	—	✓	✓	✓
Kolben		—	—	—	—	—	—	✓	✓
Pleuel		✓	—	—	—	—	—	—	—
Abgastrakt		—	✓	✓	—	—	—	—	—
Abgasnachbehandlung		—	—	—	—	—	—	(✓) ³	(✓) ³
Turbolader		—	—	(—) ¹	—	—	—	(✓) ⁴	—
Kraftstoffsystem / Injektoren		—	—	—	—	(✓) ²	✓	✓	✓
Bewertungsmatrix	Faktor	VCR	MOC	AGR	HVO	H2	MD-H	MD-SL	HD
Finanzieller Aufwand	0,20	2	4	3	5	-.6	2	1	1
THG-Einsparpotential	0,30	1	5 ⁵	4	2	5	4	4,5	3
Kraftstoff-Einsparpotential	0,30	3	1	3	1	-.6	2	2	3 ⁷
Bauraum	0,10	5	3	2	5	5	2	2	1
Umbauaufwand	0,05	3	4	2	5	4	3	2	2
Wartungsaufwand	0,05	2	5	1	5	5	3	3	2
Gesamt	1	2,4	3,4⁵	3,1	2,9	-	2,7	2,6	2,3

Ergänzungen zu Tabelle 14:

- ¹Für begrenzte AGR-Raten muss nicht zwingend eine Anpassung des Turboladers angenommen werden, wenn das Turbinenkennfeld breit genug ist für den Betrieb mit/ohne AGR
- ²Bei Wasserstoffzumischung muss bezüglich des Kraftstoffsystems in erster Linie die Mischstrecke selbst installiert werden. Rohrleitungen, Ventile etc. sollten für die geringen Wasserstoffanteil geeignet sein und müssen nicht weiter angepasst werden.
- ³Bei MD-SL und HD muss voraussichtlich ein Abgasnachbehandlungssystem (SCR) integriert werden, sofern die hohen NOX Emissionen nicht innermotorisch durch AGR reduziert werden können.
- ⁴Für MD-SL muss aufgrund der hohen globalen Lambdas voraussichtlich der Turbolader angepasst werden, um die hohen Ladedrücke bereitstellen zu können.
- ⁵Unter Vorbehalt: Annahme eines dauerhaltbaren MOCs
- ⁶Finanzieller Aufwand für H₂-Zumischung hängt stark von der Wasserstoffverfügbarkeit ab. Kraftstoffeinsparpotenzial nicht bewertet: Wirkungsgrad steigt zwar, jedoch muss der Wasserstoff selbst zusätzlich berücksichtigt werden.
- ⁷Kraftstoffeinsparpotenzial geschätzt, da nicht im vollen Betriebsbereich bekannt/quantifiziert

Fazit zum Ergebnis der Bewertungsmatrix zu den einzelnen Technologiekonzepten:

- VCR System zeichnet sich durch voraussichtlich hohen Aufwand/Kosten bei verhältnismäßig geringem Nutzen aus und eignet sich erst bei weiterer Optimierung/Wirkungsgradsteigerung für zukünftige DF-Motoren
- MOC zeichnet sich durch die höchste Bewertung aus, ist aber unter Vorbehalt zu betrachten, da es aktuell keine serientauglichen MOCs verfügbar gibt. Sollte ein dauerhaltbarer MOC entwickelt werden, stellt sich der MOC durch den geringen Aufwand bei hohem THG-Vorteil durch nachmotorische Methanreduktion als sehr effektive Technologie heraus
- AGR bietet hohes Potenzial für Emissionsreduzierung, geht aber mit hohen Systemkosten/Aufwand einher. Entsprechend der definierten Gewichtung jedoch vielversprechendstes Technologiekonzept im Rahmen des Projekts TEME2030+.
- HVO bietet die Möglichkeit, mit minimalem Aufwand einen geringen THG Vorteil zu erzielen.
- H₂-Zumischung stellte sich insgesamt als wirkungsvollste Maßnahme zur THG Reduzierung heraus, hängt jedoch stark von der Wasserstoffverfügbarkeit ab. Aufgrund der geringen Energiedichte eher für Stationäranwendungen zielführend.
- MD-H stellte sich unter den Brennverfahren mit Gasdirekteinblasung als unter anderem aufgrund des geringsten Systemaufwands vielversprechendste Technologie heraus und bietet mit der Ähnlichkeit zum ND-Brennverfahren und damit auch der unkomplizierten Kompatibilität mit allen vorherigen Technologien weitere Vorteile
- MD-SL ist bietet für einen signifikant erhöhten Entwicklungs- und Investitionsaufwand einen zusätzlichen CH₄-Vorteil für minimale THG Emissionen
- HD eignet sich aufgrund des hohen Systemaufwands bei nicht ausreichend THG/Wirkungsgradvorteil entsprechend des aktuellen Kenntnisstands nicht für zukünftige DF-Motoren

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

In diesem Kapitel werden, um inhaltliche Überschneidungen zu vermeiden, Ergebnisse der folgenden Arbeitspakete zusammengefasst dargestellt:

- AP 6: Aufbau Teilkonzept Technologieträger TEME2030+ (Thermodynamische Analyse und Potenzialbewertung der Einzelmaßnahmen als Abschluss der Niederdruck-Technologiekonzepte in AP 5)
- AP 9: Bewertung Gesamtkonzept Technologieträger TEME2030+ und Strukturierung der Ergebnisse (als abschließendes Arbeitspaket des gesamten Projekts)

Im Projekt TEME2030+ wurden diverse Technologiekonzepte (TK) untersucht. Grundsätzlich wurden die Konzepte in die drei Hauptsäulen des Projekts entsprechend der unterschiedlichen Brennverfahren unterteilt:

- Säule 1: Niederdruck-Brennverfahren
- Säule 2: Mitteldruckbrennverfahren
- Säule 3: Hochdruckbrennverfahren

Wobei das Mitteldruckbrennverfahren im Projektverlauf in zwei unterschiedliche Strategien unterteilt wurde: Homogenbetrieb (MD-H) und Schichtladung (MD-SL).

Prinzipiell konnten für jedes Technologiekonzept für sich betrachtet erfolgreich unterschiedliche Vorteile nachgewiesen werden. Ziel dieses Kapitels ist es, eine Gesamtbetrachtung und einen Vergleich der unterschiedlichen TK vorzunehmen. Die ambitionierten Projektziele von einer Reduzierung der THG Emissionen um 35 % bzw. der Methanemissionen um 90 % (<1 g/kWh Rohemissionen, $<0,5$ g/kWh inkl. Abgasnachbehandlung) wurden nicht durch ein TK allein erreicht. Entsprechend war ein Ziel dieser Arbeitspakete, sinnvolle Kombinationen der verschiedenen TKs zu definieren und experimentell zu untersuchen.

Zunächst werden in den folgenden Potenzialanalyse die einzelnen Technologiekonzepte kurz zusammengefasst und bewertet.

Da die Technologiekonzepte aus AP 5.3 (ausgeweitete Variable Ventilsteuerung) und 5.5 (Optimierung Kolben/Ring/Buchse) nicht direkt in Bezug mit einer Reduzierung der THG Emissionen gebracht werden konnten, wird sich im Folgenden auf die übrigen Konzepte reduziert, die direkt zu einer THG Reduzierung führen konnten.

Potenzialanalyse: Einsatz eines variablen Verdichtungsverhältnisses in einem Dual-Fuel-Schiffsmotor

1. Zielsetzung

- Verbesserung der Effizienz/Reduktion des Kraftstoffverbrauchs/Reduzierung der CO₂ Emissionen
 - o Wirksamkeit nachgewiesen und Wirkungsgradvorteil quantifiziert
- Reduktion CH₄-Emissionen
 - o In einzelnen Betriebsbereichen nachgewiesen
- Beurteilung der NO_x-Emissionen bei erhöhtem Verdichtungsverhältnis
 - o NO_x-Emissionen zeigen keine signifikante Steigerung durch steigendes Verdichtungsverhältnis

2. Technische Machbarkeitsanalyse

- Integration eines variablen Verdichtungsverhältnisses in den Dual-Fuel-Motor:
 - o Modifikation des Pleuels (Exzenter Pleuelauge für mittelschnelllaufende Motoren am besten umsetzbar: FEV Europe GmbH implementierte diese Art von VCR erfolgreich)
 - o Mess- & Steuerungstechnik
- Kompatibilität:
 - o Optimierung für LNG-DF Betrieb aufgrund des vergleichsweise niedrigen Verdichtungsverhältnisses entsprechend der Auslegung auf ein zulässiges Maß an Klopfen
 - o In Kombination mit ausgeweiteter variabler Ventilsteuerung bieten sich möglicherweise Wirkungsgradvorteile durch eine optimierte/kombinierte Regelungsstrategie.
 - o Kombiniertes Regelungskonzept und Synergieeffekte bei variierenden Gaszusammensetzungen

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse

- Investitionskosten:
 - o Umschaltpleuel
 - o Sensorik
 - o Regelungs- und Steuerungstechnik
 - ➔ Hoher finanzieller Aufwand
- Einsparpotenziale:
 - o Reduzierte Kraftstoffkosten
 - o Geringere THG-Emissionen → Vorteile bei ETS-Handel

4. Potentialanalyse

- Stärken:
 - o Kraftstoffeinsparung durch höhere Teillastwirkungsgrade
 - o Reduzierung der THG-Emissionen / ETS-Kosten
 - o Ein VCR-System kann prinzipiell mit weiteren TK kombiniert werden
 - o Geringer Bauraum erforderlich
 - o Synergien mit veränderlichen Brenngasqualitäten
 - o Einfache Integration in Motorsteuerung
- Schwächen:
 - o Zusätzliche mechanische Komplexität
 - o Erhöhter Wartungsaufwand
- Chancen:
 - o Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit durch geringere Betriebskosten
 - o Fördermöglichkeiten für emissionsreduzierende Technologien
- Risiken:
 - o Mechanische Belastung und Verschleiß im Dauerbetrieb

Fazit:

Die Einführung eines variablen Verdichtungsverhältnisses in einen Dual-Fuel-Schiffsmotor bietet ein signifikantes Potenzial zur Effizienzsteigerung und Emissionsreduktion. Die erfolgreiche Implementierung erfordert jedoch hohe Investitionskosten und einen erheblichen Eingriff in den Motor selbst. Die Integration in die Motorsteuerung und die Regelbarkeit wird als verhältnismäßig einfach eingeschätzt.

Potenzialanalyse: Einsatz eines Methan-Katalysators in einem Dual-Fuel-Schiffsmotor

1. Zielsetzung und Rahmenbedingungen

- Nachmotorische Reduzierung des Methanschlupfs
 - o Prinzipielle Wirksamkeit nachgewiesen (bis ca. 85 % Konvertierungsrate)
- Ausreichende Dauerhaltbarkeit/Wasserbeständigkeit
 - o Geringe Dauerhaltbarkeit, daher keine Eignung für Serienproduktion

2. Technische Machbarkeitsanalyse

- Integration eines Methan-Katalysators in den Dual-Fuel-Motor:
 - o Einbau eines Oxidationskatalysators im Abgastrakt
 - o Aktuell aufgrund der beschränkten Lebensdauer nicht verfügbar
- Kompatibilität:
 - o Potenzielle Wechselwirkungen mit AGR: In Kombination mit AGR wären zusätzliche Vorteile zu erwarten, da der Abgasmassenstrom bei vergleichbaren Temperaturen deutlich sinkt. Dadurch können die Umsatzraten gesteigert werden oder der Bauraum des MOCs verkleinert werden.
 - o Bei Technologiekonzepten, die bereits innermotorisch den Methanschlupf signifikant senken fällt der absolute Mehrwert des MOCs geringer aus

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse

- Investitionskosten:
 - o Eingriff in den Abgasstrang
 - o Katalysatormonolith mit Beschichtung (kosten sind Beschichtungsabhängig → Palladium oder Platin)
→ Mittlerer finanzieller Aufwand
- Einsparpotenziale:
 - o Geringere CH₄-Emissionen → Vorteile bei ETS-Handel

4. Potential-Analyse

- Stärken:
 - o MOC kann bei allen anderen Technologiekonzepten zusätzlich verwendet werden.
 - o Mittlere Investitionskosten, einfacher Systemaufwand
 - o Kleiner Eingriff in Gesamtsystem des Schiffs
 - o Einfache Integration in Motorsteuerung
- Schwächen:
 - o Bisher keine Dauerhaltbarkeit nachgewiesen
 - o Teure Katalysatorbeschichtungen erforderlich, Nutzung seltener Erden (Preisschwankungen)
- Risiken:
 - o Geringe Umsatzraten bei niedrigen Abgastemperaturen
 - o Technologische Abhängigkeit von Edelmetall-Katalysatoren
 - o Geringe Dauerhaltbarkeit

Fazit:

Die Einführung eines Methan-Katalysators in einen Dual-Fuel-Schiffsmotor bietet theoretisch ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung des Methanschlupfs und zur Einhaltung zukünftiger Emissionsvorgaben, allerdings müssen dafür noch erhebliche Entwicklungsfortschritte hinsichtlich der Dauerhaltbarkeit sowie der Light-Off Temperatur erzielt werden. Daher ist die nachmotorische Methanreduzierung derzeit nicht sinnvoll möglich.

Potenzialanalyse: Erweiterung eines Dual-Fuel-Schiffsmotors um ein AGR-System

1. Zielsetzung

- Reduktion der Stickoxidemissionen zur Einhaltung des IMO Tier III Grenzwerts
 - o Wirksamkeit experimentell nachgewiesen und quantifiziert
- Reduktion der CH₄-Emissionen
 - o In definierten Betriebsbereichen nachgewiesen, sinnvolle Betriebsbereiche ermittelt
- Zusätzlich wurden in Teilen des Lastprofils leichte Wirkungsgradvorteile nachgewiesen
- Offene Ziele: Untersuchungen zum Einsatz von AGR bei HD-Brennverfahren

2. Technische Machbarkeitsanalyse

- Integration eines AGR-Systems in den Dual-Fuel-Motor:
 - o Modifikation der Ladeluftführung
 - o Installation einer AGR-Strecke unter anderem inkl.
 - Gebläse/Verdichter
 - Kondensatabscheider
 - Verrohrung
 - Wärmeübertrager
 - Kühlsystem
 - o Steuerungstechnik zur Anpassung der AGR-Rate an Last- und Kraftstoffart
 - o Auslegung des Turboladers für den Betrieb mit/ohne AGR muss geprüft werden. Ein Abgleich der experimentellen Ergebnisse bezüglich Abgastemperatur/Massenstrom ergab, dass ein passender ATL den Betrieb mit wirkungsgrad-optimalen AGR-Raten (ca. 10-20 % AGR) und ohne AGR abdecken kann. Für hohe AGR-Raten wäre voraussichtlich eine Anpassung erforderlich.
- Kompatibilität:
 - o In Kombination mit Wasserstoffzumischung können durch die verbesserten Brennbedingungen potenziell höhere AGR-Raten ohne Wirkungsgradeinbußen gefahren werden und NO_x dadurch weiter gesenkt werden.
 - o Insbesondere bei MD-SL oder HD-Brennverfahren und den dabei hohen NO_x Emissionen förderlich

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse

- Investitionskosten:
 - o Eingriff in Frischluft- und Abgastrakt
 - o Aufbau AGR-Strecke
 - o Anpassung der Motorsteuerung
 - ➔ Mittlerer bis hoher finanzieller Aufwand
- Einsparpotenziale:
 - o Geringere THG-Emissionen → Vorteile bei ETS-Handel

4. Potential-Analyse

- Stärken:
 - o Reduktion der NO_x-Emissionen → Vereinfachte Einhaltung gesetzlicher Vorschriften
 - o Potenzielle Kraftstoffeinsparung
- Schwächen:
 - o Komplexität der Motorsteuerung
 - o Großer Bauraum benötigt
 - o Großer Eingriff in Gesamtsystem des Schiffs
 - o Hoher Wartungsaufwand
- Potentiale:
 - o Fördermöglichkeiten für emissionsreduzierende Technologien
 - o Langfristige Betriebskostenreduktion
 - o NO_x-Reduktion sehr gut: Reduktion der hohen NO_x-Emissionen auch bei MD- und HD-Brennverfahren oder anderen Kraftstoffen möglich
- Risiken:
 - o Technische Herausforderungen bei der Nachrüstung

Fazit:

Die Integration eines AGR-Systems in einen Dual-Fuel-Schiffsmotor bietet erhebliche Potenziale zur NO_x-Reduktion und Umweltentlastung. Der Einsatz bei ND-DF Motoren erlaubt eine Reduzierung der CH₄ Emissionen und Wirkungsgradvorteile durch einfacheres Einhalten des IMO Tier III Grenzwerts. Eine erfolgreiche Umsetzung erfordert jedoch eine sorgfältige Steuerungsanpassung.

Potenzialanalyse: Regenerative Kraftstoffe: H2-Zumischung

1. Zielsetzung

- Verbesserung der Effizienz
 - o Erfolgreich nachgewiesen und quantifiziert
- Reduktion THG-Emissionen
 - o Überproportionale Reduktion nachgewiesen (Substitution von fossilem Kraftstoff und Wirkungsgradvorteile + reduzierte CH4-Emissionen)
- Untersuchung NOX und Klopfen:
 - o Keine erhöhten Werte bei geeigneter Regelungsstrategie

2. Technische Machbarkeitsanalyse

- Anwendung von H2-Zumischung
 - o Aus Platzgründen nur für Stationäranwendungen sinnvoll
- Kompatibilität:
 - o In Kombination mit AGR Vorteile zu erwarten: verbessertes Durchbrandverhalten lässt höhere AGR-Raten bei reduzierten Wirkungsgradeinbußen und damit eine weitere NO_x-Reduzierung zu

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse

- Investitionskosten:
 - o Gasmischstrecke
 - ➔ Geringer finanzieller Aufwand wenn Wasserstoff prinzipiell verfügbar ist
- Einsparpotenziale:
 - o Vorteile bei ETS-Handel

4. Potential-Analyse

- Stärken:
 - o Signifikante Reduzierung der THG-Emissionen
- Schwächen:
 - o Aufgrund des hohen Platzbedarfs (Speicher) eher für Stationäranwendungen geeignet
- Chancen:
 - o Bei guter Wasserstoffverfügbarkeit sehr hohes Potenzial
 - o Bereits geringe Zumischraten erzielen überproportionale THG Reduktion
- Risiken:
 - o Wasserstoffkosten/Verfügbarkeit

Fazit:

Wasserstoffzumischung war unter den im Rahmen des Projekts TEME2030+ untersuchten Einzelmaßnahmen prinzipiell das effektivste Technologiekonzept zur THG-Reduzierung. Damit bietet es ein erhebliches Potenzial bei guter Wasserstoffverfügbarkeit. Aufgrund der geringen Speicherdichte ist eine weite Verbreitung in aktuellen Schiffsmotoren nicht zu erwarten. In Stationäranwendungen oder bei guter Verfügbarkeit von Wasserstoff sollte die Option in Betracht gezogen werden. Der Aufwand ist bei guter Verfügbarkeit gering: Motor, Gasventile, Kraftstoffsystem kann größtenteils bestehen bleiben. Lediglich die Zumischstrecke selbst (mit geeigneter Steuerung/Regelung) muss integriert werden. Außerdem ist ein Regelungskonzept auf Basis der Zylinderdruckauswertung erforderlich.

Potenzialanalyse: Regenerative Kraftstoffe: HVO

1. Zielsetzung

- Substitution des fossilen Pilotkraftstoffs durch regeneratives HVO
- Reduzierung der aus dem Pilotkraftstoff resultierenden CO₂ Emissionen

2. Technische Machbarkeitsanalyse

- Einsatz von HVO als Pilotkraftstoff
 - o Regelungskonzept auf Basis von Zylinderdruckauswertung erforderlich
 - o Ansonsten minimaler Aufwand für den Einsatz von HVO
- Kompatibilität:
 - o Unabhängig von anderen Technologien flexibel einsetzbar

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse

- Investitionskosten:
 - o Keine Anpassungen erforderlich
 - o Ausschließlich Betriebskosten/Kraftstoffkosten zu beachten
- Einsparpotenziale:
 - o Vorteile bei ETS-Handel

4. Potential-Analyse

- Stärken:
 - o Bei guter Verfügbarkeit einfache Möglichkeit zur THG Reduktion
- Schwächen:
 - o Kraftstoffkosten/Verfügbarkeit
 - o Anteil der THG Emissionen aus dem Pilotkraftstoff bei LNG-DF Motoren relativ gering, entsprechend geringes Reduktionspotenzial
- Chancen:
 - o Flexibel Einsetzbar je nach Verfügbarkeit
- Risiken:
 - o keine

Fazit:

Den Pilotkraftstoff durch regeneratives HVO zu ersetzen war technisch das einfachste Konzept im Rahmen des Projekts TEME2030+. Hardware-Anpassungen sind nicht erforderlich, es muss lediglich HVO getankt werden. Aufgrund der höheren Zündwilligkeit im Vergleich zu Diesel EN590 wirkt sich der Kraftstoff allerdings auf die Verbrennung aus, entsprechend ist ein geeignetes Regelungskonzept auf Basis der Zylinderdruckanalyse erforderlich.

Potenzialanalyse: Einsatz eines MD-DI-Verfahrens in einem Dual-Fuel-Schiffsmotor

1. Zielsetzung

- Verbesserung der Effizienz
 - o nur in Teilen des Betriebsbereichs erfolgreich nachgewiesen
 - o MD-SL Brennverfahren mit leichten Nachteilen ohne optimierte Piloteinspritzstrategie
- Reduktion CH₄-Emissionen resultierend aus Überströmen während der Ventilüberschneidung
 - o Erfolgreich nachgewiesen bei MD-H/SL
- Reduktion CH₄-Emissionen resultierend aus Flammlöschungseffekten
 - o Erfolgreich nachgewiesen bei MD-SL
- Einhalten des IMO-Tier III Grenzwerts
 - o Im MD-Homogenbrennverfahren ohne Gegenmaßnahme einzuhalten, vergleichbar zu ND-Brennverfahren
 - o Im Schichtladungsbrennverfahren Gegenmaßnahmen erforderlich. AGR förderlich, jedoch in den bisherigen Untersuchungen noch nicht ausreichend.
- Offene Ziele:
 - o Brennverfahrensoptimierung & weitere Wirkungsgradvorteile ausschöpfen

2. Technische Machbarkeitsanalyse

- Umbau eines Dual-Fuel-Motors auf Mitteldruck-Gasdirekteinblasung:
 - o Umfangreiche Anpassungen am Kraftstoffsystem
 - Gasverdichter (MD-SL) oder Ertüchtigung des Verdampfers für höhere Drücke (MD-H)
 - Eingriff in Zylinderkopf (Injektoraufnahme)
 - Gas-Injektoren
 - MD-Gasinfrastruktur (PN40 könnte für MD-H ausreichen, für MD-SL PN63 oder PN100 erforderlich)
 - Entwicklungsaufwand für Integration in Motorsteuerung (für MD-SL >> MD-H)
 - Zusätzliche Hardwareanpassungen für MD-SL
 - o Mess- & Regelungstechnik
- Kompatibilität:
 - o MD-H: hohe Vergleichbarkeit zum ND-Brennverfahren, daher können für ND verfügbare Technologiekonzepte auch für MD-H verwendet werden
 - o MD-SL: durch die hohen NO_x-Emissionen gewinnt AGR als Gegenmaßnahme an Bedeutung

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse

- Investitionskosten:
 - o MD-H: Kraftstoffsystem, Integration in Motorsteuerung
 - o MD-Schichtladungsbetrieb: zusätzliche Hardwareanpassungen erforderlich, stark erhöhter Entwicklungsaufwand für Motorsteuerung notwendig

➔ Hoher finanzieller Aufwand
- Einsparpotenziale:
 - o Vorteile bei ETS-Handel

4. Potential-Analyse

- Stärken:
 - o Signifikante Reduzierung CH₄-Emissionen
 - o NO_x-Emissionsgrenze kann mit MD-H ohne AGN eingehalten werden
 - o Stufenweise Nachrüstung möglicherweise sinnvoll: erst MD-H mit verhältnismäßig geringem Aufwand, gleichzeitig bleibt die Möglichkeit für die Applikation eines MD-SL-Brennverfahrens zu einem späteren Zeitpunkt bestehen
- Schwächen:
 - o Weitere Entwicklung für Wirkungsgradsteigerung (insbesondere bei MD-SL) nötig
 - o Hoher finanzieller Aufwand
 - o Zusätzliche mechanische Komplexität
 - o Höherer Wartungsaufwand für Injektoren zu erwarten
 - o Diesel-Vollastfähigkeit als Rückfallebene entfällt
- Chancen:
 - o Fördermöglichkeiten für emissionsreduzierende Technologien
- Risiken:

- Finanzieller Aufwand
- Herausforderungen bei der Steuerung

Fazit:

Prinzipiell bietet die MD-Direkteinblasung hohes Potenzial für THG Reduktion. Dem gegenüberstehen jedoch hohe Investitionskosten und umfangreicher Entwicklungsbedarf für eine Nachrüstung sowie der Wegfall des reinen Dieselbetriebs als Rückfallebene. Aufgrund des Neuigkeitscharakters der Injektoren bzw. Brennverfahren ist jedoch noch Entwicklungspotenzial zu erwarten. Mit vergleichsweise kurzer Untersuchungszeit im Vergleich zum ND-Brennverfahren, welches bereits etabliert ist und umfassend untersucht wurde, konnte schnell eine vergleichbare Performance in Bezug auf Wirkungsgrad und Verbrennungsstabilität bei reduzierten CH₄ Emissionen erzielt werden. Mithilfe der im Projekt entwickelten Methoden und Modelle (z.B. CFD) kann die innere Gemischbildung und Kraftstoffführung weiter optimiert werden, um das volle Potenzial auszuschöpfen und die Vorteile der unterschiedlichen Strategien (MD-H/SL) möglicherweise zu kombinieren.

Potenzialanalyse: Einsatz eines HD-DI-Verfahrens in einem Dual-Fuel-Schiffsmotor

1. Zielsetzung

- Verbesserung der Effizienz
- Reduktion CH₄-Emissionen resultierend aus Überströmen während der Ventilüberschneidung
- Reduktion CH₄-Emissionen resultierend aus Flammlöschungseffekten
- Einhalten des IMO-Tier III Grenzwerts
- Offene Ziele:
 - o Brennverfahrensoptimierung & weitere Wirkungsgradvorteile ausschöpfen

2. Technische Machbarkeitsanalyse

- Umbau eines Dual-Fuel-Motors auf Hochdruck-Gasdirekteinblasung:
 - o Umfangreiche Anpassungen am Kraftstoffsystem
 - Gasverdichter
 - Eingriff in Zylinderkopf (Injektoraufnahme)
 - Gas-Injektoren
 - HD-Gasinfrastruktur (>300 bar)
 - Entwicklungsaufwand für Integration in Motorsteuerung (für HD>>MD-SL>>MD-H)
 - o Mess- & Regelungstechnik
- Kompatibilität:
 - o Durch die hohen NO_x-Emissionen gewinnt AGR als Gegenmaßnahme an Bedeutung

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse

- Investitionskosten:
 - o HD: Kraftstoffsystem, Integration in Motorsteuerung
➔ Hoher finanzieller Aufwand
- Einsparpotenziale:
 - o Vorteile bei ETS-Handel

4. Potential-Analyse

- Stärken:
 - o Signifikante Reduzierung CH₄-Emissionen
 - o NO_x-Emissionsgrenze kann mit MD-H ohne AGN eingehalten werden
 - o Stufenweise Nachrüstung möglicherweise sinnvoll: erst MD-H mit verhältnismäßig geringem Aufwand, gleichzeitig bleibt die Möglichkeit für die Applikation eines MD-SL-Brennverfahrens zu einem späteren Zeitpunkt bestehen
- Schwächen:
 - o Weitere Untersuchungen für Wirkungsgradsteigerung nötig
 - o Hoher finanzieller Aufwand
 - o Zusätzliche mechanische Komplexität
 - o Höherer Wartungsaufwand für Injektoren zu erwarten
 - o Diesel-Vollastfähigkeit als Rückfallebene entfällt
- Chancen:
 - o Fördermöglichkeiten für emissionsreduzierende Technologien
 - o Hoher Energieaufwand für Druckerzeugung
- Risiken:
 - o Finanzieller Aufwand
 - o Herausforderungen bei der Steuerung

Fazit:

Das Ziel des Hochdruck-Brennverfahrens, niedrigste CH₄ Emissionen konnte in Teilen nachgewiesen werden. Gleichzeitig konnte im Rahmen des Projekts TEME2030+ jedoch noch kein Wirkungsgradvorteil gegenüber ND / MD nachgewiesen werden. Des Weiteren ist ein hoher Systemaufwand sowie Energieaufwand für die Druckerzeugung notwendig. Daher konnte auf Basis der gesammelten Ergebnisse noch keine Serientauglichkeit nachgewiesen werden.

Kombination geeigneter Technologiepakete

Nach der Potenzialbewertung der unterschiedlichen Technologiekonzepte, die im Rahmen des Projekts untersucht wurden war nun eine Kombination sinnvoller TKs ein weiteres Ziel dieses Arbeitspakets. Aufgrund der Überschneidung mit AP 6, in dem bereits die Niederdruckkonzepte untersucht und kombiniert wurden, werden nachfolgend alle untersuchten Konzepte auf die Kompatibilität hin untersucht, um geeignete Motorkonzepte für zukünftige Entwicklungen definieren zu können. Bestimmte Kombinationen wurden am Motor getestet und die Wirksamkeit experimentell nachgewiesen. Um den Versuchsumfang zu reduzieren, wurde die Kompatibilität auf unterschiedliche Weisen geprüft. Aufgrund der Vergleichbarkeit des MD-H Brennverfahrens, was Betriebsparameter wie Lambda, Abgastemperaturen und thermodynamische Zusammenhänge betrifft, konnte angenommen und mit definierten Stichprobenversuchen validiert werden, dass die Technologiekonzepte für das ND-Brennverfahren prinzipiell mit vergleichbaren Effekten auf das MD-Brennverfahren angewandt werden können, um die Emissionen weiter zu senken. Abbildung 84 zeigt die Kompatibilität der unterschiedlichen Technologien miteinander. Grundsätzlich konnten die meisten Technologien miteinander kombiniert werden und zu einer weiteren Emissionsreduzierung führen. In den meisten Fällen handelt es sich allerdings um Effekte, die sich gegenseitig nicht signifikant beeinflussen. Als Synergieeffekte oder nachteilige Kombinationen stellten sich die folgenden Kombinationen heraus:

- MOC kann bei allen anderen Technologiekonzepten zusätzlich verwendet werden, um den Methanschlupf weiter zu reduzieren. Bei TKs wie H2-Zumischung, MD-SL, und HD, die für sich betrachtet bereits den Methanschlupf signifikant senken, ist der absolute Mehrwert der nachmotorischen CH4 Reduktion kleiner. Des Weiteren sinkt aufgrund der hohen Luftverhältnisse bei MD-SL die Abgastemperatur, was sich negativ auf die Umsatzrate des MOCs auswirkt. In Kombination mit AGR sind jedoch zusätzliche Vorteile zu erwarten, da AGR primär auf NOX Reduzierung abzielt. Zusätzliche Vorteile sind weiterhin zu erwarten, da durch AGR der Abgasmassenstrom bei vergleichbaren Temperaturen deutlich sinkt. Dadurch könnten die Umsatzraten gesteigert werden oder der Bauraum des MOCs verkleinert werden.
- In Kombination mit Wasserstoffzumischung können durch das verbesserte Durchbrandverhalten höhere AGR-Raten gefahren werden und so die Stickoxide bei geringeren Wirkungsgradverlusten weiter reduziert werden.

TEME2030+	Säule 1					Säule 2		Säule 3
	VCR	MOC	AGR	HVO	H2	MD-H	MD-SL	HD
VCR		o	o	o	o	o	o	o
MOC			+	o	-	o	-	-
AGR				o	+	o	+	+
HVO					o	o	o	o
H2						o	o	o
MD-H								
MD-SL								
HD								
+	Kombination von TKs eignet sich besonders gut durch zusätzliche Synergieeffekte							
o	Jedes TK kann für sich betrachtet einen THG Vorteil erzielen, durch die Kombination mit anderen TKs entsteht jedoch kein zusätzlicher, übermäßiger Vorteil							
-	Durch die Kombination der einzelnen TKs sinkt der absolute Vorteil einer einzelnen TK							

Abbildung 84: Bewertung der Kombination unterschiedlicher Technologiekonzepte

Nachdem die Funktionalität der unterschiedlichen Konzepte betrachtet wurde, wird in der folgenden Abbildung das Reduzierungspotenzial der Einzelmaßnahmen direkt miteinander verglichen und das Gesamtreduzierungspotenzial durch Kombination mehrerer Konzepte quantifiziert. Aufgrund der Übertragbarkeit der Zusammenhänge vom ND Brennverfahren auf das MD-Homogenbrennverfahren und der daraus resultierenden guten Kompatibilität mit den untersuchten Niederdruck-Technologien, wurde MD-H in die Zusammenstellung mit aufgenommen.

		Eingabe Reduzierungspotenzial CO ₂ /CH ₄ einzelnes TK															
		Eingabe Vergleichsbasis (ND-PFI)															
		Ergebnis Reduzierungspotenzial THG oder kombinierte TK															
Konservativ gerechnet	Vergleichsbasis	Säule 1 / ND / innermotorische Maßnahmen												Säule 2 / MD		Abgasnachbehandlung	
		VCR		AGR		H ₂		HVO		MD-H		MOC					
	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh		
Reduzierungspotenzial der einzelnen Technologiekonzepte für sich betrachtet	CO ₂	475,0	0,6%	472,2	2,0%	465,5	5,5%	448,9	3,0%	460,8	0,0%	475,0	0,0%	475,0	0,0%		
	CH ₄	2,0	5,0%	1,9	20,0%	1,6	30,0%	1,4	0,0%	2,0	30,0%	1,4	0,0%	2,0	0,0%		
	THG_20	643,0	1,7%	631,8	6,7%	599,9	11,9%	566,5	2,2%	628,8	7,8%	592,6	0,0%	643,0	0,0%		
	THG_100	531,0	1,1%	525,4	3,9%	510,3	8,1%	488,1	2,7%	516,8	3,2%	514,2	0,0%	531,0	0,0%		
Gesamtreduzierungspotenzial durch Kombination der einzelnen TK	CO ₂	475,0	0,6%	472,15	2,6%	462,7	7,9%	437,3	10,7%	424,1	10,7%	424,1	10,7%	424,1	10,7%		
	CH ₄	2,0	5,0%	1,9	24,0%	1,5	46,8%	1,1	46,8%	1,1	62,8%	0,7	62,8%	0,7			
	THG_20	643,0	1,7%	631,8	8,2%	590,4	18,1%	526,6	20,1%	513,5	24,3%	486,7	24,3%	486,7	24,3%		
	THG_100	531,0	1,1%	525,4	4,8%	505,3	12,0%	467,1	14,5%	453,9	16,2%	445,0	16,2%	445,0	16,2%		
		nur VCR		VCR+AGR		VCR+AGR+H ₂		VCR+AGR+H ₂ +HVO		VCR+AGR+H ₂ +HVO+MD-H		VCR+AGR+H ₂ +HVO+MD-H+MOC					

Best Case	Vergleichsbasis	Säule 1 / ND / innermotorische Maßnahmen												Säule 2 / MD		Abgasnachbehandlung	
		VCR		AGR		H ₂		HVO		MD-H		MOC					
	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh	Reduzierung %	Emissionen g/kWh		
Reduzierungspotenzial der einzelnen Technologiekonzepte für sich betrachtet	CO ₂	475,0	0,8%	471,2	2,0%	465,5	11,0%	422,8	8,0%	437,0	1,0%	470,3	0,0%	475,0	0,0%		
	CH ₄	2,0	7,0%	1,9	40,0%	1,2	50,0%	1,0	0,0%	2,0	50,0%	1,0	85,0%	0,3			
	THG_20	643,0	2,4%	627,4	11,9%	566,3	21,2%	506,8	5,9%	605,0	13,8%	554,3	22,2%	500,2	0,0%		
	THG_100	531,0	1,5%	523,3	6,0%	499,1	15,1%	450,8	7,2%	493,0	6,2%	498,3	9,0%	483,4	0,0%		
Gesamtreduzierungspotenzial durch Kombination der einzelnen TK	CO ₂	475,0	0,8%	471,2	2,8%	461,8	13,5%	411,0	20,4%	378,1	21,2%	374,3	21,2%	374,3	21,2%		
	CH ₄	2,0	7,0%	1,86	44,2%	1,1	72,1%	0,6	72,1%	0,6	86,1%	0,3	97,9%	0,0			
	THG_20	643,0	2,4%	627,4	13,6%	555,5	28,8%	457,9	33,9%	425,0	38,1%	397,8	41,2%	377,8	0,0		
	THG_100	531,0	1,5%	523,3	7,2%	493,0	19,7%	426,6	25,9%	393,7	28,0%	382,1	29,3%	375,5	0,0		
		nur VCR		VCR+AGR		VCR+AGR+H ₂		VCR+AGR+H ₂ +HVO		VCR+AGR+H ₂ +HVO+MD-H		VCR+AGR+H ₂ +HVO+MD-H+MOC					

Abbildung 85: Übersicht über das THG-Reduzierungspotenzial der einzelnen Technologiekonzepte bzw. der Kombination mehrerer Technologien

Erläuterungen zu Abbildung 85:

- Als Vergleichsbasis wurden Werte für CO₂/CH₄ Emissionen repräsentativ für das ND-Brennverfahren entsprechend der Basisvermessung eingetragen
- Für jedes TK wurden das Reduzierungspotenzial für CO₂/CH₄ eingetragen und die resultierende THG-Reduzierung errechnet (CH₄ mit Faktor 84 auf 20 Jahre bzw. mit Faktor 28 auf 100 Jahre eingerechnet)
- In der jeweils oberen Zeile einer Tabelle ist das Reduzierungspotenzial der Einzelmaßnahme, in der unteren Zeile ist das Reduzierungspotenzial durch die Kombination der unterschiedlichen TK abzulesen (von links nach rechts VCR, VCR+AGR; VCR+AGR+H₂ etc.)
- Zunächst wurden die vier TKs mit nachgewiesenem innermotorischem Reduzierungspotenzial bei ND berücksichtigt. Anschließend wird zusätzlich MD-H betrachtet, da durch die Ähnlichkeit zum ND-Brennverfahren auch die vorherigen Technologiekonzepte kompatibel sind und dementsprechend vergleichbare Reduzierungspotenziale aufweisen. Als letzte Maßnahme ist die nachmotorische Reduktion via MOC aufgeführt. MD-SL und HD sind nicht aufgeführt, da es sich um grundverschiedene Brennverfahren handelt und die Effekte der Einzelmaßnahmen nicht zwingend direkt übertragbar sind.
- In der oberen Tabelle wurde ein Szenario mit vergleichsweise niedrigen CO₂/CH₄-Vorteilen erstellt, um ein Mindestpotenzial zu quantifizieren. In der unteren Tabelle wurden hohe CO₂/CH₄-Vorteile eingesetzt, um das Maximalpotenzial zu bewerten. Dabei wurden die eingesetzten Werte in einzelnen Messreihen oder Betriebspunkten nachgewiesen, jedoch konnte der Vorteil noch nicht über das gesamte Betriebsprofil erreicht werden. Prinzipiell wären solche Emissionswerte mit umfangreichem Optimierungsaufwand für jede Einzeltechnologie und sorgfältig applizierten Betriebsparametern denkbar.

Ausgewählte Resultate aus Abbildung 85:

- Durch die Kombination aller innermotorischen TKs im ND-Brennverfahren (rot markiert) können die CH₄ Emissionen in Szenario 1 rechnerisch um 46,8 % auf 1,1 g/kWh reduziert werden. Unter Berücksichtigung von Faktor 84 (20 Jahre Berechnungszeitraum) und mit den zusätzlichen CO₂ Vorteilen entspricht das einer Reduktion der THG-Emissionen um 20,1 %
- Mit zusätzlicher MD-Direkteinblasung können die CH₄ Emissionen insgesamt um 62,8 % auf 0,7 g/kWh gesenkt werden.
- In Szenario 2 (Maximalwerte angenommen, innermotorische Maßnahmen + MD-H) können die CH₄-Emissionen rechnerisch sogar um 86,1 % auf 0,3 g/kWh (THG_20 um 38,1 %) reduziert werden.

Damit konnten die wichtigsten Projektziele grundsätzlich erreicht werden.

Durch nachmotorische Methanreduktion konnten die CH₄ Emissionen in Szenario 2 (Best Case) bereits ohne die Kombination mit anderen TKs auf <0,5 g/kWh gesenkt werden, allerdings steht die Technologie aufgrund der kurzen Dauerhaltbarkeit aktuell nicht für den Serienbetrieb zur Verfügung.

In der folgenden Abbildung ist das Reduzierungspotenzial der Brennverfahren MD-SL (Basis und emissionsoptimiert) sowie HD dargestellt. Um hierbei vergleichbare Bedingungen für die unterschiedlichen Konzepte zu realisieren, bezieht sich die Vergleichsbasis hierbei auf einen ausgewählten Betriebspunkt bei 50 % Last. An den negativen Werten bei der CO₂ Reduzierung ist erkennbar, dass zum derzeitigen Entwicklungsstand noch Wirkungsgradnachteile gegenüber den Homogenbrennverfahren hinzunehmen sind. Durch die signifikante CH₄ Reduzierung konnten jedoch die Gesamt-THG Emissionen mit allen Konzepten reduziert werden. Da es sich um grundverschiedene Technologiekonzepte handelt, die untereinander nicht miteinander kombiniert werden können, wurde in dieser Zusammenstellung die zweite Zeile mit der Kombination der TKs nicht gezeigt. Grundsätzlich können die untersuchten Technologiekonzepte jedoch auch mit den Brennverfahren MD-SL und HD kombiniert werden, was am Beispiel AGR bereits nachgewiesen wurde.

	Vergleichsbasis		MD-SL		MD-SL+AGR+VE		HD	
	Emissionen g/kWh	%	Emissionen g/kWh	%	Emissionen g/kWh	%	Emissionen g/kWh	%
Reduzierungspotenzial der einzelnen Technologiekonzepte für sich betrachtet	CO ₂	482,5	-4,0%	501,8	-2,0%	492,2	-6,0%	511,5
	CH ₄	3,5	58,0%	1,5	75,5%	0,9	75,0%	0,9
	THG_20	776,5	19,5%	625,3	27,3%	564,2	24,7%	585,0
	THG_100	580,5	6,5%	543,0	11,1%	516,2	7,7%	536,0

Abbildung 86: Übersicht über das CO₂/CH₄ Reduzierungspotenzial der Brennverfahren MD-SL (Basis und emissionsoptimiert) sowie HD

Charakterisierung Technologiekonzepte für zukünftige Marinemotoren

Auf Basis der gewonnenen Einblicke werden drei Technologiekonzepte für zukünftige Marinemotoren vorgeschlagen.

Konzept 1: Update der bestehenden Motorgeneration

Das erste Konzept ist ein kleineres Update der bestehenden Motorgeneration. Als Brennverfahren kann das Niederdruck-Brennverfahren bestehen bleiben. Diese Motoren können durch das verwendete Magerbrennverfahren die IMO Tier III Emissionsvorgaben bereits ohne AGN erreichen. Hierbei steigen CH₄ Emissionen in den bekannten NO_x – CH₄ trade off. Um Methanemissionen zu senken und gleichzeitig unter dem NO_x Grenzwert zu bleiben wird ein SCR-Katalysator empfohlen. Ein erhöhtes Verdichtungsverhältnis steigert die Effizienz des Motors. Hierfür ist eine optimierte Regelungsstrategie auf Basis der Zylinderdruckauswertung notwendig, um die Gefahr der klopfenden Verbrennung zu umgehen.

- ND-DF
- SCR
- Erhöhtes Verdichtungsverhältnis
- Optimierte Regelungsstrategie

Konzept 2: umfangreiche Retrofit Maßnahme

Ein zweites Konzept wird für eine intensivere Retro-Fit Maßnahme vorgeschlagen. Hier könnte das Mitteldruck-Homogen Brennverfahren verwendet werden, um bessere CH₄-Schlupf Werte zu erzielen. Hierfür wäre der Einbau eines Gas-Direktinjektors notwendig, die Druckerzeugung soll durch eine Anpassung des Verdampfers erfolgen. Um die Vollastfähigkeit der DF-Motoren zu gewährleisten, wäre ein geeigneter Zweinadelinjektor erforderlich, der Sowohl die Diesel, als auch die Gas-Vollastmenge bereitstellen kann. Durch diese Maßnahme könnte eine Leistungssteigerung sowie eine bessere Motordynamik bei besseren Emissionswerten erreicht werden. Aufgrund der Kompatibilität zwischen ND & MD-H könnten auch die Technologien aus Konzept 1 verwendet werden, um die Emissionen weiter zu senken.

- Konzept 1 + MD-H

Konzept 3: Neuentwicklung zukünftiger Gas-DF-Motoren

Das dritte Konzept betrifft die Neuentwicklung zukünftiger Gas DF Motoren. Hier wäre ein Brennverfahren zu entwickeln, das die Vorteile von dem Mitteldruck-Homogen Verfahren und dem Mitteldruck-Schichtladung verfahren vereint. Hierfür wäre eine optimale Abstimmung zwischen Kolben- und Injektordesign notwendig. Ein AGR-System reduziert die bei der Schichtladung entstehenden NO_x Emissionen und senkt zusätzlich CH₄ Emissionen weiter. Dadurch wäre ein Einhalten von IMO Tier III gegebenenfalls ohne AGN denkbar. Durch eine optimierte Piloteinspritzstrategie mit Dieselvoreinspritzung sollte der Methanschlupf noch weiter gesenkt werden.

Dokumentation, Veröffentlichung, Wissenstransfer

Im Rahmen des Projekts TEME2030+ wurden 15 national und international veröffentlichte Publikationen, inkl. zwei Promotionen, erstellt. Diese sind in Kapitel 2.6 einzeln aufgeführt. In Bezug auf die Ausbildung von Fachkräften wurden im Rahmen des Projekts zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten (Bachelor-, Studien- & Masterarbeiten) sowie studentische bzw. wissenschaftliche Hilfskräfte vergeben und betreut. Des Weiteren wurden mit dem durchgeführten Projekt die Grundlagen für drei geplante Promotionen geschaffen. Zusätzlich wurden mehrfach Laborpraktika im Themenfeld des Einzylindermotors durchgeführt und einzelne Vorlesungsveranstaltungen mit Inhalten aus dem Projekt gefüllt. Innerhalb des Projektkonsortiums erfolgte eine enge Vernetzung und ein umfangreicher Wissenstransfer. Als Basis diente ein von der FVTR GmbH bereitgestellter Sharepoint und eine strukturierte Messgrößenomenklatur.

Die Ergebnisse, Methoden, Auswerteskripte und Simulations- bzw. Berechnungsmodelle wurden strukturiert dokumentiert und auf dem Projektlaufwerk abgelegt und stehen damit für zukünftige Projekte zur Verfügung.

Im Rahmen des Projekts haben sich bereits erste Kontakte/Gespräche zur Umsetzung von Industrieprojekten ergeben.

2.2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

812/817 Personalkosten LKV 1.692.517,41 €

In den Personalkosten sind alle Arbeitsleistungen der am Projekt beteiligten Fachkräfte in Form von folgenden Positionen enthalten:

- Bauliche Erweiterungs- und Optimierungsmaßnahmen des Prüfstandes und dessen Peripherien
- Programmiertechnische Entwicklung bzw. Erweiterungs- und Optimierungsmaßnahmen von Auswerterroutinen für Prüfstandsdaten
- Auslegung und Beschaffung von Prüfstandssystemen
- Prüfstandsbetrieb mit paralleler Datenerfassung
- Turnusbasierte Sicherheitsüberprüfungen von Prüfstandsperipherien
- Projektkoordination und –dokumentation
- Analyse und Beurteilung von erfassten Daten aus Prüfstandsbetrieb
- Simulationsgestützte Brennverfahrensentwicklung
- Aktive Teilnahme an Fachtagungen
- Ausarbeitung von Publikationen / Schaffung wissenschaftlicher und infrastruktureller Voraussetzungen für Dissertationsvorhaben

850 Gegenstände und andere Investitionen 1.573.582,52 €

Im Rahmen des Projektes wurden diverse Investitionen getätigt, die zur Realisierung der Projektziele notwendig waren. Hier ergaben sich die größten Positionen in der Erweiterung des Prüfstandes durch zusätzliche Installationen von Peripherien wie bspw. dem HD-Brenngasverdichter, den Gas-DI-Injektoren, der Erweiterung der Gasmischstrecke sowie der AGR Strecke. Außerdem wurden vorhandene Systeme durch die Investitionen erweitert bzw. optimiert. Dies betrifft vor allem das Controlling des Prüfstandes in Bezug auf das Steuergerät, der Messtechnik und der Automatisierung. Auf simulativer Seite wurde ein anforderungsangepasster Hochleistungs-PC beschafft und die Rechentechnik in Form von Clustererweiterungen konfiguriert. Des Weiteren wurden Investitionen in die Infrastruktur der Komponentenprüfstände Gaseinblaseverlaufsindikator und Hochdruck-Hochtemperatur-Einspritzkammer für die Funktionsprüfung und Vermessung der Gasinjektoren getätigt (Gasversorgung, Sicherheitstechnik, Mess- & Steuerungstechnik).

835 Vergabe von Aufträgen 284.647,93 €

Aufgrund der Komplexität des Prüfstandes und der damit verbundenen Aufgaben konnten nicht alle anfallenden Arbeiten durch eigenes Personal umgesetzt werden, sodass einzelne Aufträge an Fremdfirmen vergeben werden mussten. Diese beziehen sich Großteiles auf Arbeiten bzgl. der Installation des HD-Verdichters wie bspw. Verrohrung, Elektrifizierung oder Automatisierung. Außerdem wurden hier alle technischen Überprüfungen positioniert, die durch externe Sachverständige durchgeführt wurden.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die in der Einzelvorhabensbeschreibung dargestellten Arbeiten wurden wie geplant im Rahmen des Projektfortschritts abgearbeitet. Dank der umfangreichen Erweiterungen des Prüfstandes konnten erfolgreich Ergebnisse in Bezug auf den Einfluss der eingebrachten Kraftstoffe und der Gemischbildung auf das Brennverfahren generiert werden. Auch im Bereich der Motorkomponenten (bspw. Kolbenmuldenform, Injektoren) konnten wichtige Erkenntnisse für optimierte Motorkonfigurationen herausgearbeitet werden. Seitens der Simulation konnten sehr gute Übereinstimmungen mit den vorhandenen Messdaten des Prüfstandbetriebes erzielt

werden, wodurch weiteres Optimierungspotential in einem frühen Stadium der Brennverlaufsbetrachtung ermöglicht wird. Die erfolgreichen Ausarbeitungen bestätigen somit die entsprechende Notwendigkeit bzw. Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertung im Sinne des Verwertungsplans

Der in diesem Projekt verwendete hochmodernisierte Forschungsprüfstand und die Simulationsmodelle bilden die Grundlage für weitere wissenschaftliche Tätigkeiten in folgenden Projekten. Durch das erlangte Fachwissen über die unterschiedlichen Brennverfahren können weitere darauf aufbauende Projekte bearbeitet werden und das diesbezügliche Know-how am Lehrstuhl weiter vertieft werden. Des Weiteren wurden die Komponentenprüfstände umfassend erweitert und für neue Kraftstoffe ertüchtigt und stellen somit auch eine gute Basis für zukünftige Forschungs- und Industrieprojekte dar.

Des Weiteren werden die herausgearbeiteten Ergebnisse für Publikationen auf Fachtagungen verwendet. Die Forschungsergebnisse der Themengebiete der unterschiedlichen Brennverfahren ND/MD/HD (simulativ & experimentell) und Abgasrückführung bilden die Grundlage für die geplanten Dissertationen von Projektmitgliedern seitens des LKV.

Außerdem wurde im Rahmen des abgeschlossenen Projekts TEME2030+ auf Basis der Vorkenntnisse des vorangegangenen Projekts LEDF Konzept 2 das Regelungskonzept für den Betrieb mit variierenden Gaszusammensetzungen entwickelt und zum Patent angemeldet [DE102022121793A1 „Piloteinspritzbasiertes Regelungskonzept zur Verwendung unterschiedlichster Brenngasqualitäten an Dual-Fuel-Motoren“]. Im aktuellen Stand der Technik werden Dual-Fuel-Motoren (DF-Motoren) in der Regel auf eine Mindestmethanzahl ausgelegt, die sich aus den zu erwartenden Gasqualitäten entsprechend dem Einsatzprofil eines Schiffes ergibt. Weichen die tatsächlich eingesetzten Brenngaszusammensetzungen davon ab, kommt es bislang zu Wirkungsgradeinbußen oder zu einer Lastreduzierung des Motors (Derating). Das neu entwickelte Regelungskonzept ermöglicht hingegen den flexiblen Betrieb von DF-Motoren bei unterschiedlichen Brenngasqualitäten durch eine angepasste Piloteinspritzstrategie, ohne übermäßige Bauteilbelastungen infolge klopfender Verbrennung oder Einbußen bei Wirkungsgrad und Last hinnehmen zu müssen. Aufgrund der positiven Ergebnisse wurde das Patent nicht nur national, sondern auch international angemeldet; das Verfahren befindet sich derzeit in Bearbeitung.

Innerhalb des Projektkonsortiums wurden Messdaten ausgetauscht und dienen als Grundlage für zukünftige Entwicklungen der jeweiligen Partner.

2.5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem Projektverbund sind keine relevanten Veröffentlichungen bekannt geworden.

2.6. Erfolgte bzw. geplante Veröffentlichungen

Liste der Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts TEME2030+ wurden folgende Veröffentlichungen getätigt:

- 01.12.2021 **MTZ Heavy Duty Tagung, 2021**
- 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: Dipl.-Ing. Karsten Schleef, Dr.-Ing. Björn Henke, M.Sc. Sebastian Cepelak, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Dr.-Ing. Martin Theile*
-
- 02.02.2022 **Dissertation, Universität Rostock**
- Titel: Potenzialanalyse zur Stickoxid- und Methanemissionsreduzierung in mittelschnelllaufenden Dual-Fuel-Motoren unter Anwendung von Mehrfacheinspritzstrategien
- Autor: M.Sc. Björn Henke, Abschluss: Dr.-Ing.
-
- 06.09.2022 **SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Conference, Krakau, 2022**
- Titel: Combustion Control Strategies for Dual-Fuel Marine Engines operated with fluctuating LNG Qualities
- Autoren: Dipl.-Ing. Karsten Schleef, Dr.-Ing. Björn Henke, M.Sc. Sebastian Cepelak, M.Sc. Manuel Glauner, M.Sc. Jules Dinwoodie, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Dr.-Ing. Martin Theile*
-
- 25.04.2023 **Dissertation, Universität Rostock**
- Titel: Optimization of Dual-Fuel Engine Utilizing Flexible Valve Train Technology
- Autor: Mina Abaskharon, Abschluss: Dr.-Ing.
-
- 10.05.2023 **12. Tagung Einspritzung und Kraftstoffe, Dessau, 2023**
- Titel: Entwicklungsprozess der experimentellen und simulativen Charakterisierung von MD-/HD-DI-Gasinjektoren an Marine-Dual-Fuel-Motoren
- Autoren: M.Sc. Sebastian Cepelak, Dipl.-Ing. Manuel Glauner, M.Sc. Niklas Gierenz, M.Sc. Jules Dinwoodie, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Erich Vogt*, Bernd Niethammer**
-
- 16.06.2023 **CIMAC Congress, Busan, 2023**
- 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: Dr.-Ing. Karsten Schleef, Dr.-Ing. Björn Henke, M.Sc. Sebastian Cepelak, Dipl.-Ing. Manuel Glauner, Dr.-Ing. Martin Theile***, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz
-
- 28.09.2023 **Dissertation, Universität Rostock**
- Titel: Analyse und Optimierung des Verbrennungsprozesses von Dual-Fuel-Motoren bei Betrieb mit schwankenden Brenngasqualitäten
- Autor: Dipl.-Ing. Karsten Schleef, Abschluss: Dr.-Ing.

- 08.11.2023 **Automotive and Engine Technology 8, 2023**
 Titel: Effect of flexible camshaft technology on dual-fuel engine performance using phenomenological combustion model
 Autoren: Dr.-Ing. Mina Abaskharon, M.Sc. Sebastian Cepelak, Dr.-Ing. Björn Henke, Dr.-Ing. Karsten Schleef, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz
- 12.09.2024 **8. Rostocker Großmotorentagung, Rostock, 2024**
 Titel: 3D – CFD Simulation of Direct Gaseous Injection for a Medium Speed Dual-Fuel Engine
 Autoren: M.Sc. Jules Dinwoodie, M.Sc. Sebastian Cepelak, Dipl.-Ing. Manuel Glauner, M.Sc. Pascal Seipel, Dr.-Ing. Karsten Schleef, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Dr.-Ing. Martin Theile
- 12.11.2024 **MTZ Heavy-Duty-, On- und Off-Highway-Motoren, Eisenach, 2024**
 Titel: Numerical Analysis of a Medium Pressure Gaseous Direct Injector on a Marine Medium Speed Dual-Fuel Engine
 Autoren: M.Sc. Jules Dinwoodie, M.Sc. Sebastian Cepelak, Dipl.-Ing. Manuel Glauner, M.Sc. Pascal Seipel, Dr.-Ing. Karsten Schleef, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Dr.-Ing. Martin Theile
- 08.05.2025 **13. Tagung Einspritzung und Kraftstoffe, Dessau, 2025**
 Titel: Experimentelle und simulative Untersuchung von Mehrfacheinspritzstrategien an einem mittelschnelllaufenden Dual-Fuel Motor im Mitteldruck-Brennverfahren
 Autoren: M.Sc. Pascal Seipel, M.Sc. Sebastian Cepelak, M.Sc. Jules Dinwoodie, Dipl.-Ing. Manuel Glauner, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Dr.-Ing. Fabian Pinkert
- 19.05.2025 **CIMAC Congress, Zürich, 2025**
 Titel: Experimental characterization of an MPDI gas injector for four-stroke applications
 Autoren: M.Sc. Sebastian Cepelak, M.Sc. Jules Dinwoodie, Dipl.-Ing. Manuel Glauner, M.Sc. Pascal Seipel, Dr.-Ing. Karsten Schleef, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Prof. Dr.-Ing. Frederik Borchsenius
- 19.05.2025 **CIMAC Congress, Zürich, 2025**
 Titel: Experimental Long-Term Study of a Methane Oxidation Catalyst on a Medium-Speed Dual-Fuel Engine
 Autoren: M.Sc. Pascal Seipel, M.Sc. Sebastian Cepelak, M.Sc. Jules Dinwoodie, Dipl.-Ing. Manuel Glauner, Dr.-Ing. Karsten Schleef, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Dr.-Ing. Robert Bank
- 19.05.2025 **CIMAC Congress, Zürich, 2025**
 Titel: Numerical and experimental analysis of gas DI operation on a medium-speed dual-fuel marine engine
 Autoren: M.Sc. Jules Dinwoodie, M.Sc. Pascal Seipel, M.Sc. Sebastian Cepelak, Dipl.-Ing. Manuel Glauner, Dr.-Ing. Karsten Schleef, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Dr.-Ing. Martin Theile

- 19.05.2025 **CIMAC Congress, Zürich, 2025**
- Titel: Lowest GHG emissions on medium-speed engines by higher Epsilon and H2 admission to the fuel gas
- Autoren: Dipl.-Ing. Manuel Glauner, M.Sc. Jules Dinwoodie, M.Sc. Pascal Seipel, M.Sc. Sebastian Cepelak, Dr.-Ing. Karsten Schleef, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Dr.-Ing. Martin Theile
-
- 23.06.2025 **MARINE, Edinburgh, 2025**
- Titel: A 3D – CFD Analysis of Gas Direct Injection for a Dual – Fuel Medium Speed Marine Engine
- Autoren: M.Sc. Jules Dinwoodie, M.Sc. Pascal Seipel, M.Sc. Sebastian Cepelak, Dipl.-Ing. Manuel Glauner, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz, Dr.-Ing. Martin Theile
-
- 04.09.2025 **SMTP Kongress, Graz, 2025**
- Titel: Experimental Investigations on Medium- and High-Pressure Direct Gas Injection on a Medium-Speed Dual-Fuel Single-Cylinder Engine
- Autoren: Dipl.-Ing. Manuel Glauner, M.Sc. Jules Dinwoodie, M.Sc. Pascal Seipel, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz
-
- 15.09.2025 **SAE ICE 2025 (Capri)**
- Titel: Effects of Varying the Air-Fuel Equivalence Ratio at Different EGR-Rates on a Medium-Speed LNG-Diesel Dual-Fuel Engine
- Autoren: M.Sc. Pascal Seipel, Dipl.-Ing. Manuel Glauner, M.Sc. Jules Dinwoodie, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz

3. Danksagung

Die Autoren möchten sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Projektes TEME2030+ (Förderkennzeichen 03SX537C) bedanken.

Darüber hinaus gilt unser Dank den Projektpartnern Schaller Automation GmbH & Co. KG & FVTR GmbH, sowie den assoziierten Projektpartnern Kolbenschmidt KS Large Bore Pistons Germany GmbH, M. JÜRGENSEN GmbH & Co. KG und Kompressorenbau Bannewitz, Umicore AG & Co. KG und SICK AG.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages