

Motor- und Steuerungsoptimierungen für synthetische Ottokraftstoffe

Christoph Florian Kraus

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr. Malte Jaensch
2. Prof. Dr.-Ing. André Casal Kulzer

Die Dissertation wurde am 04.06.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 30.09.2024 angenommen.

Vorwort

Diese Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile Antriebssysteme, vormals Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, entstanden. Zwischen April 2020 und Dezember 2023 konnte ich mich an der Technischen Universität München intensiv mit nachhaltigen Kraftstoffen und deren Potenzial auseinandersetzen.

Besonders bedanken für die Zeit am Lehrstuhl möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Professor Malte Jaensch. Durch seine fachübergreifende Kompetenz im Bereich der mobilen Antriebssysteme ermöglichte er es mir, meine Forschung in den richtigen Kontext einzubetten. Durch seine Technologieoffenheit ermutigte er mich auch in Zeiten des „Verbrennerverbots“, die Relevanz und Motivation dieser Arbeit nicht aus den Augen zu verlieren. Die mir gewährten Freiräume motivierten mich zudem zu eigenständigem Denken und ermöglichten mir, meine Forschung auch in Bereichen abseits von Projekten zu vertiefen.

Diese Arbeit wurde mir zum einen durch ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt ermöglicht. In diesem Sinne möchte ich mich auch bei meinem Oberingenieur PD Martin Härtl für die fachliche Leitung und für die Grundlagen zu meiner Forschungsfrage bedanken. Zum anderen möchte ich auch Hitachi, vertreten durch Henning Sauerland und Akiyasu Miyamoto, nicht unerwähnt lassen. Die Zusammenarbeit mit Hitachi als Industriepartner war für den Betrieb und weitere Verbesserung des Prüfstandes unerlässlich. Ich habe zu danken.

Ohne meine Vorgänger am Lehrstuhl, hier besonders Sebastian Blochum, oder meine aktiven Kollegen, wie Felix Fellner und Patrick Fitz, wäre meine Arbeit keinesfalls möglich gewesen. Diese Kollegen halfen mir den Prüfstand zu „brechen“ und dabei emotionale wie körperliche Schäden zu vermeiden. Weitere Verbesserungen des Motors und des Prüfstands konnten nur durch die hervorragende Werkstatt und deren Mitarbeiter umgesetzt werden. Um bei den Angestellten zu bleiben, muss natürlich auch Marita Weiler genannt werden, die mir half, die Untiefen der TUM-Organisation zu umschiffen. Vielen Dank an euch alle!

Zusätzlich möchte ich mich auch bei meinen zahlreichen Hochleistungsstudenten bedanken, welche entscheidend zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Meiner Familie und meinen Freunden will ich danken, die mich auch in der Zeit der langen Prüfstandstage nicht vergessen haben und die mir immer zur Seite standen, wenn ich sie gebraucht habe.

Prutting, im Januar 2024

Christoph Kraus

Abstract

Oxygenated C1-fuels such as methanol, dimethyl carbonate, or methyl formate can substitute gasoline as potential greenhouse gas-neutral alternatives in internal combustion engines. Moreover, the used oxygenated fuels are characterized by low pollutant emissions and high robustness against combustion anomalies.

By adapting and validating the evaluation methodology of a Fourier-Transform Infrared Spectroscopy exhaust measurement system, it is possible to examine currently unregulated pollutants in addition to standard pollutants. Engine control and hardware optimizations are being carried out to further unlock the fuel potential regarding pollutant emissions and efficiency.

The demonstration is primarily conducted on a single-cylinder research engine. Results from optical spray investigations and the injection rate analyzer support the interpretation of engine measurement data. The production engine ensures the transferability of critical findings to real-world operating conditions.

Pollutant emissions and engine performance of oxygenate fuels significantly depend on the injection strategy. Through optimization, pollutant emissions have been reduced both under hot engine and cold start conditions. Under normal working conditions, a multiple injection strategy was employed to achieve particulate number emissions close to ambient levels, especially at the most challenging high-load operation point. Additionally, a three-way catalyst was utilized to effectively remove regulated and unregulated gaseous pollutants. The system behavior is further improved by hardware adjustments to the injector and to the piston design. Testing with a higher compression ratio piston using synthetic fuel demonstrates an efficiency gain, with a maximum absolute efficiency of 41% achieved at 2500 rpm and full load, surpassing the 36.4% of the conventional gasoline-fueled engine.

TUM-Abstract:

This thesis focuses on optimizing a spark ignition direct injection research engine for oxygenated C1 fuels like methanol, aiming to maximize their potential for reducing pollutants and improving efficiency. The study involves varying injection strategies, injectors, and pistons while evaluating both regulated and secondary pollutants.

TUM-Kurzfassung:

In dieser Dissertation wird ein Ottomotor mit direkter Einspritzung für C1-Oxygenatkraftstoffe wie Methanol optimiert, um das Potenzial der Kraftstoffe zur Reduzierung von Schadstoffen und zur Steigerung der Effizienz weiter auszuschöpfen. Dabei wird die Einspritzstrategie, der Injektor und der Kolben variiert, während sowohl reglementierte als auch sekundäre Schadstoffe bewertet werden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abkürzungsverzeichnis | III |
| Formelzeichen..... | VI |
| Abbildungsverzeichnis | VII |
| Tabellenverzeichnis..... | IX |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Nachhaltige Alternativen zu fossilem Benzin | 1 |
| 1.2 Forschungsfragen | 2 |
| 1.3 Struktur der Arbeit..... | 3 |
| 2 Stand der Technik | 4 |
| 2.1 Entwicklungsziele für moderne Ottomotoren in Personenkraftwagen | 4 |
| 2.1.1 Wirkungsgradsteigerung | 4 |
| 2.1.2 Reduktion von Schadstoffemissionen..... | 7 |
| 2.2 Synthetische Ottokraftstoffe | 10 |
| 2.2.1 Normkonforme Benzinalternativen | 11 |
| 2.2.2 C1-Oxygenatkraftstoffe: Methanol und C65F35 | 13 |
| 2.3 Abgasmesstechnik für Oxygenatkraftstoffe | 15 |
| 2.4 Motoroptimierungen für Oxygenatkraftstoffe..... | 18 |
| 2.4.1 Ausgangsbasis für optimierte Motoren | 18 |
| 2.4.2 Experimentelle Studien im aktuellen Forschungskontext | 19 |
| 2.5 Forschungsbedarf und Zielsetzung dieser Arbeit..... | 24 |
| 3 Methode..... | 25 |
| 3.1 Einzylinder-Forschungsmotor und weitere Versuchsträger | 25 |
| 3.2 Versuchs- und Auswertungsmethodik..... | 32 |
| 3.2.1 Versuchspunkte und Messdatenerfassung..... | 32 |
| 3.2.2 Messdatenaufbereitung | 34 |
| 3.2.3 1-D Simulation: Druckverlaufsanalyse | 35 |
| 4 Ergebnisse | 36 |
| 4.1 Anpassung der FTIR-Methode an DMC/MeFo-haltige Kraftstoffe | 36 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.2 | Einspritzstrategie für verschiedene Kraftstoffzusammensetzungen | 39 |
| 4.3 | Optimierung der Einspritzung unter Kaltstart-Bedingungen | 42 |
| 4.4 | Anpassung des Injektors und des Kraftstoffdrucks | 44 |
| 4.5 | Wirkungsgradsteigerung durch Kolbenanpassung..... | 47 |
| 5 | Diskussion | 49 |
| 6 | Zusammenfassung..... | 58 |
| 7 | Ausblick..... | 60 |
| | Literaturverzeichnis..... | 61 |
| | Vorveröffentlichungsliste | 81 |
| | Anhang | 84 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------------------|---|
| °CA | Grad Kurbelwinkel (engl. <u>C</u> rank <u>A</u> ngle) |
| A100 | Alkylatbenzin |
| AGR | Abgasrückführung |
| aTDCf | Nachdem oberen Zündtotpunkt (engl. <u>a</u> fter <u>T</u> op <u>D</u> ead <u>C</u> enter <u>f</u> iring) |
| ATL | <u>A</u> bgas <u>t</u> urbo <u>l</u> ader |
| C35F35 | Kraftstoffmischung bestehend aus 65 vol% <u>D</u> M <u>C</u> und 35 vol% <u>M</u> e <u>F</u> o |
| CH ₂ O | Formaldehyd |
| CH ₂ O ₂ | Ameisensäure |
| CH ₄ | Methan |
| CLD | <u>C</u> hemilumineszenz <u>d</u> etektor |
| CO | Kohlenstoffmonoxid |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| COV _{pmi} | Standardabweichung des indi. Mitteldrucks (engl. <u>C</u> oefficient of <u>V</u> ariation) |
| CPC | <u>C</u> ondensation <u>P</u> article <u>C</u> ounter |
| CS | Oxidationskatalysator (engl. <u>C</u> atalytic <u>S</u> triper) |
| DI | Direkteinspritzung (engl. <u>D</u> irect <u>I</u> njection) |
| DIN EN | <u>D</u> eutsche <u>I</u> ndustrie- <u>N</u> orm und <u>E</u> uropäische <u>N</u> orm |
| DMC | Dimethylcarbonat |
| DVPE | berechnet: dem trockenen Dampfdruck entsprechender Druck (engl. <u>d</u> ry <u>v</u> a- <u>p</u> our <u>p</u> ressure <u>e</u> quivalent) |
| EF-00 | E-Fuel Injektorprototyp mit angepasstem Durchfluss |
| EF-05 | E-Fuel Injektorprototyp mit angepasstem Durchfluss und Spraytarget |
| EPA | United States <u>E</u> nvironmental <u>P</u> rotection <u>A</u> gency |
| ET | <u>E</u> vaporation- <u>T</u> ube |
| EU | <u>E</u> uropäische <u>U</u> nion |
| Euro-6 | Abgasnorm Euro-6 |
| Euro-7 | Abgasnorm Euro-7 |
| EVI | <u>E</u> inspritz <u>v</u> erlaufs <u>i</u> ndikator |
| FID | <u>F</u> lammenionisations <u>d</u> etektor |
| FTIR | <u>F</u> ourier- <u>T</u> ransform- <u>I</u> nfrarot Abgasanalysegerät |
| G100 | Fossiles Referenzbenzin (Euro-5) |

| | |
|------------------|--|
| GHS | <u>G</u> lobal <u>H</u> armonisiertes <u>S</u> ystem zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien |
| HCN | Cyanwasserstoff (Blausäure) |
| JRC | Gemeinsame Forschungsstelle der EU (engl. <u>J</u> oint <u>R</u> esearch <u>C</u> enter) |
| KIT | <u>K</u> arlsruher <u>I</u> nstitut für <u>T</u> echnologie |
| m. % | Masseprozent |
| M100 | Methanol |
| MeFo | Methylformiat |
| Meemo | <u>M</u> ethanol aus <u>e</u> rneuerbarer <u>E</u> nergie für <u>M</u> obilität mit Plug-in-Hybridfahrzeugen |
| MeOH | Methanol |
| MON | Motoroktanzahl (engl. <u>M</u> otor <u>O</u> ctane <u>N</u> umber) |
| MPD | Paramagnetischer Sauerstoffanalysator (engl. <u>M</u> agnetopneumatic <u>D</u> etector) |
| MT | <u>M</u> esstechnik |
| N ₂ O | Distickstoffmonoxid |
| NDIR | <u>N</u> icht- <u>D</u> ispersiver- <u>I</u> nfra <u>R</u> ot-Analysator |
| NH ₃ | Ammoniak |
| NO _x | Stickoxide, bestehend aus NO und NO ₂ |
| OPF | <u>O</u> tto- <u>P</u> artikelfilter |
| P100 | Synthetisches, zertifiziert nachhaltiges, normkonformes Benzin |
| PKW | <u>P</u> ersonen <u>k</u> raft <u>w</u> agen |
| PM | <u>P</u> artikel <u>m</u> asse |
| PN | Partikelanzahlkonzentration (engl. <u>P</u> articulate <u>N</u> umber) |
| PN10 | Partikelanzahlkonzentration mit 50% Zähleffizienz bei 10 nm Partikelgröße |
| PN23 | Partikelanzahlkonzentration mit 50% Zähleffizienz bei 23 nm Partikelgröße |
| RDE | <u>R</u> eal <u>D</u> riving <u>E</u> missions-Homologationsmessung im realen Betrieb |
| RON | Research Oktanzahl (engl. <u>R</u> esearch <u>O</u> ctane <u>N</u> umber) |
| SMPS | <u>S</u> canning <u>M</u> obility <u>P</u> article <u>S</u> izer |
| SOI | Einspritzzeitpunkt (engl. <u>S</u> tart <u>o</u> f <u>I</u> njection) |
| SUV | <u>S</u> port <u>U</u> tility <u>V</u> ehicle |
| T | Toxisch |
| THC | unverbrannte Kohlenwasserstoffe (engl. <u>T</u> otal <u>h</u> ydro <u>c</u> arbon emissions) |
| THG | <u>T</u> reib <u>h</u> aus <u>g</u> as |
| Tier 3 | EPA-Standard für Emissionswerte |
| TPA | Druckverlaufanalyse (engl. <u>T</u> hree <u>P</u> ressure <u>A</u> nalysis) |
| TU | <u>T</u> echnische <u>U</u> niversität |

| | |
|------|---|
| TUM | Technische Universität München |
| TWC | Dreiwegkatalysator (engl. <u>T</u> hree <u>W</u> ay <u>C</u> atalyst) |
| U | <u>U</u> niversität |
| UN | Vereinte Nationen (engl. <u>U</u> nited <u>N</u> ations) |
| VOC | Volatile organische Verbindungen (engl. <u>V</u> olatile <u>O</u> rganic <u>C</u> ompounds) |
| VW | Volkswagen |
| WHO | Weltgesundheitsorganisation (engl. <u>W</u> orld <u>H</u> ealth <u>O</u> rganisation) |
| WLTC | <u>W</u> orldwide harmonized <u>L</u> ight vehicles <u>T</u> est <u>C</u> ycle |
| ZK | <u>Z</u> ylinder <u>k</u> opf |
| Z-DI | <u>Z</u> entraler <u>I</u> njektor im Brennraumdach |

Formelzeichen

| Formelzeichen | Einheit | Beschreibung |
|-------------------------------|----------------|--------------------------------------|
| $c_{p,T}$ | J/(kg K) | Spez. Wärmekapazität des Abgases |
| $c_{p,V}$ | J/(kg K) | Spez. Wärmekapazität der Frischluft |
| H_U | MJ/kg | Unterer Heizwert |
| L_{\min} | - | stöchiometrischen Mindestluftbedarf |
| $\dot{m}_{\text{Kraftstoff}}$ | kg/s | Kraftstoffmassenstrom |
| \dot{m}_{Luft} | kg/s | Luftmassenstrom |
| \dot{m}_T | kg/s | Abgasmassenstrom |
| \dot{m}_V | kg/s | Frischlufmassenstrom |
| n | U/min | Drehzahl |
| p_1 | Pa | Druck vor Verdichter |
| p_2 | Pa | Druck nach Verdichter |
| p_3 | Pa | Druck vor Turbine |
| p_4 | Pa | Druck nach Turbine |
| P_i | kW | Indizierte Leistung |
| p_{mi} | bar | Indizierter Mitteldruck |
| T_1 | K | Temperatur Frischluft |
| T_3 | K | Temperatur vor Turbine |
| V_H | m ³ | Hubvolumen |
| ϵ | - | geometrisches Verdichtungsverhältnis |
| η_{GR} | - | Wirkungsgrad Gleichraum |
| η_i | - | Indizierter Wirkungsgrad |
| η_{TL} | - | Gesamtwirkungsgrad Turbolader |
| κ | - | Isentropenexponent |
| κ_T | - | Isentropenexponent Abgas |
| κ_V | - | Isentropenexponent der Frischluft |
| λ | - | Verbrennungsluftverhältnis |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Verlustteilung am Referenzpunkt des Einzylinder-Forschungsmotors | 5 |
| Abbildung 2: Entwicklungsstrategien zur Wirkungsgradsteigerung | 6 |
| Abbildung 3: Abgaszusammensetzung eines PKW-Ottomotors, gasförmige Bestandteile nach [50], Werte überprüft , ergänzt und angepasst an Motormessdaten | 7 |
| Abbildung 4: Schlüsseltechnologien zur Abgasreinigung moderner Benzinmotoren | 9 |
| Abbildung 5: Nachhaltige Produktion synthetischer Kraftstoffe, modifiziert nach [121] | 11 |
| Abbildung 6: Aufbau verschiedener PN-Messsysteme, modifiziert nach [28, 170, 173]..... | 17 |
| Abbildung 7: Motorentwicklung für C1-Oxygenatkraftstoffe..... | 18 |
| Abbildung 8: Literatur ab 2020: Wirkungsgradpotenzial und Schadstoffeinfluss für $\lambda=1$ | 20 |
| Abbildung 9: Verwendete Einspritzsysteme in Motorenversuchen mit C1-Oxygenaten..... | 23 |
| Abbildung 10: Einzylinder-Forschungsmotor und Optimierungen | 26 |
| Abbildung 11: Prüfstands Aufbau..... | 27 |
| Abbildung 12: Lambda-Variation für C65F35: Schadstoffe vor/nach Dreiwegekatalysator | 28 |
| Abbildung 13: Lambda-Messwerte für C65F35 und zentraler Direkteinspritzung..... | 28 |
| Abbildung 14: Abgasturbolader-Simulation: Auswirkung auf Effizienzkenngößen | 30 |
| Abbildung 15: Weitere sekundäre Versuchsträger/Messaufbauten..... | 31 |
| Abbildung 16: Versuchspunkte im Vergleich zum RDE/WLTC für $\lambda=1$, C65F35 [26, 61]..... | 32 |
| Abbildung 17: Simulations-Modell zur Druckverlaufsanalyse in GT-Suite | 35 |
| Abbildung 18: Methodenvergleich im Methanolbetrieb: TUM gegen IAG_Methanol_R4 | 38 |
| Abbildung 19: Synthetisches Benzin-Erweiterung um P100..... | 41 |
| Abbildung 20: Veranschaulichung der Kaltstartproblematik mit Lösungsansatz | 43 |
| Abbildung 21: Zentrale Direkteinspritzung: Schadstoffvergleich von C65F35 zu Benzin | 46 |
| Abbildung 22: C65F35: Vorteile der zentralen im Vergleich zur seitlichen Direkteinspritzung.. | 46 |
| Abbildung 23: Wandwärme- und Brennverlaufsverluste: C65F35 – MeOH – Kolbenvariation. | 48 |
| Abbildung 24: Veranschaulichung der PN10-Quelle im Niedriglastbereich | 51 |
| Abbildung 25: Diskussion Effizienzmaximierung durch Kolbenaufbau | 56 |
| Abbildung 26: Zylinderdruckverläufe von C65F35: $\epsilon \sim 20^\circ$, 17 bar p_{mi} , 2000 U/min [239] | 57 |
| Abbildung 27: Einfluss des Einspritzzeitpunktes auf den Liefergrad | 85 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 28: Abgasgegendruck - Einfluss auf Wirkungsgrad und Schlüsselbestandteile | 86 |
| Abbildung 29: Ergebnis der Abgasturbolader-Simulation für Benzin, MeOH ($\epsilon=11/19.6$)..... | 86 |
| Abbildung 30: Startzeitpunkte von G-DI und zentral Injektor (Z-DI2) für Methanol..... | 87 |
| Abbildung 31: Zentrale Einspritzung (Z-DI2) im Vergleich zum G-DI für Methanol | 87 |
| Abbildung 32: Datenblatt G100 (1/2) | 89 |
| Abbildung 33: Datenblatt G100 (2/2) | 90 |
| Abbildung 34: Datenblatt Alkylatbenzin (1/2)..... | 91 |
| Abbildung 35: Datenblatt Alkylatbenzin (2/2)..... | 92 |
| Abbildung 36: Datenblatt P100 | 93 |
| Abbildung 37: PIONA P100 | 94 |
| Abbildung 38: Datenblatt Methanol..... | 95 |
| Abbildung 39: Datenblatt DMC, MeFo (1/2)..... | 96 |
| Abbildung 40: Datenblatt DMC (2/2)..... | 97 |
| Abbildung 41: Datenblatt MeFo (2/2)..... | 98 |
| Abbildung 42: Datenblatt C65F35..... | 99 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Schadstoffbestandteile und deren Entstehung/Wirkung | 8 |
| Tabelle 2: Kraftstoffdaten der normkonformen Benzinalternativen, modifiziert nach [132]..... | 12 |
| Tabelle 3: Untersuchte synthetische Kraftstoffe/Blendbestandteile, modifiziert nach [148]..... | 14 |
| Tabelle 4: Abgasanalysemesstechnik zur Bewertung von Oxygenatkraftstoffen | 16 |
| Tabelle 5: Benötigte Kenngrößen der ersten Abgasturbolader-Gleichung | 29 |
| Tabelle B.1: Datenblatt Öl: Mobil 1 ESP | 88 |
| Tabelle B.2: Additive des 5W30 Öls-Untersuchung durchgeführt von Oelcheck GmbH | 88 |

1 Einleitung

1.1 Nachhaltige Alternativen zu fossilem Benzin

Anthropogene Treibhausgasemissionen (THG), insbesondere Kohlenstoffdioxid (CO₂), müssen reduziert werden, um das Pariser Klimaziel zu erreichen [1]. Im Jahr 2021 waren mit bis zu 8% der direkten CO₂-Emission Autos und Vans Hauptverursacher von menschenverursachten Treibhausgasen [2]. Dies ist primär auf den im Personenverkehr größtenteils verwendeten Energieträger Benzin zurückzuführen [2]. Es ist dringend erforderlich, diesen möglichst schnell durch nachhaltige Alternativen zu ersetzen.

Verschiedene Energieträger sind aus technischer Sicht realisierbar, um diese Herausforderung zu bewältigen. Allen voran ermöglicht die Nutzung von Strom im Sinne der Elektromobilität einen Weg zur lokalen Emissionsfreiheit. Ein Vorteil dieser Technologie ist die hohe Nutzungseffizienz im Fahrzeug [3] und die Vermeidung verbrennungserzeugender Schadstoffe. Konzeptfahrzeuge erreichen eine Effizienz von der Batterie bis zum Rad von bis zu 95% [4]. Nachteilig ist, dass die THG-Einsparung abhängig von der Stromproduktion für den jeweiligen Ladepunkt ist [5, 6]. Global betrachtet ist fraglich, ob die reine Elektrifizierung von Personenkraftwagen (PKW) den schnellsten und effektivsten Weg zur Dekarbonisierung darstellt [7, 8].

Ein kohlenstofffreier Energieträger, der weltweit durch große Investitionen unterstützt wird, ist Wasserstoff [9–11]. Wasserstoff kann in konventionellen, verbrennungsmotorischen Antrieben genutzt werden [12–14] und mittels Elektrolyse und erneuerbarem Strom THG-neutral produziert werden [15]. Wie für die Elektromobilität wird auch für Wasserstoff der Aufbau einer neuen Infrastruktur benötigt, um den Energieträger zu den Fahrzeugen zu bringen.

Diesen Nachteil teilen synthetische, flüssige Kraftstoffe nicht, die somit einen vielversprechenden Ansatz zur schnellen Reduktion von THG darstellen [16, 17]. Der Hauptnachteil synthetischer Kraftstoffe besteht im hohen Energieaufwand, der für die Herstellung erforderlich ist. Es ist daher entscheidend eine möglichst effiziente Nutzung im Fahrzeugantrieb zu gewährleisten. Zudem sollte die Produktion an einem Standort erfolgen, an welchem große Mengen THG-neutraler Energie zur Verfügung stehen [18, 19] oder überschüssige Ressourcen genutzt werden können [20]. Durch die vorhandene Infrastruktur und die relativ hohe Energiedichte ist der Transport vom Produktionsort zum Kunden unproblematisch. Bereits jetzt sind skalierbare Pilotanlagen zur kommerziellen Herstellung dieser Kraftstoffe für den Automobilbereich im Betrieb [21, 22]. Die Vorteile synthetischer, strombasierter Kraftstoffe hat auch die Kommission der Europäischen Union (EU) erkannt und ermöglicht eine gezielte Förderung [23, 24]. Ein synthetisches, normkonformes Benzin kann die THG-Intensivität der bereits vorhandenen Fahrzeuge reduzieren. Innerhalb der Norm sind Potenziale hinsichtlich Schadstoffreduktion und Effizienzsteigerung möglich [25, 26]. Außerhalb der Norm ist für zukünftige Motoren ein maßgeschneiderter Kraftstoff realisierbar. Durch die synthetische Herstellung können verschiedene, vorher rohöl- oder normbedingte Eigenschaften deutlich verbessert werden. Eine aus

motorischer Sicht vielversprechende Kraftstoffgruppe sind sogenannte C1-Oxygenate [16, 17]. Diese können potenziell THG-neutral verwendet werden [16, 27–31], und weisen im Vergleich zu Benzin eine größere Robustheit gegenüber Verbrennungsanomalien sowie einen geringeren Schadstoffausstoß auf [16, 32–34]. Die hohe Robustheit gegenüber Verbrennungsanomalien ermöglicht durch Motoranpassungen bessere Wirkungsgrade [16, 17]. Zusätzlich ist im Einsatz der C1-Oxygenate im Vergleich zu Benzin einen niedrigeren Schadstoffausstoß realisierbar. Dies ist auf den höheren Sauerstoffanteil und das Fehlen von C-C-Bindungen zurückzuführen, was zu einer Reduzierung von Ruß- und NO_x-Emissionen führt [16, 32, 35].

1.2 Forschungsfragen

Speziell für den direkteinspritzenden Ottomotor werden in dieser Arbeit mögliche synthetische Kraftstoffe, Motor- und Steuerungsoptimierungen untersucht. Es werden neben einem fossilen Referenzbenzin zwei normkonforme, synthetische Kraftstoffe als Benchmark verwendet. Hauptaugenmerk liegt jedoch auf den C1-Oxygenaten Methanol und C65F35. Ziel ist es, ein bestehendes Motorkonzept an die Eigenschaften dieser Oxygenate anzupassen und dadurch die Effizienz zu steigern und den Schadstoffausstoß zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen drei zentrale Forschungsfragen beantwortet werden:

- 1) Wie kann eine detaillierte Untersuchung der gasförmigen Abgaszusammensetzung von C1-Oxygenaten durchgeführt werden, um die Kraftstoffe bezüglich reglementierter und nicht reglementierter Schadstoffemissionen zu evaluieren?

Mittels eines Fourier-Transform-Infrarot Abgasanalysegeräts (FTIR) kann die gasförmige Abgaszusammensetzung eines Motors differenziert analysiert werden. Beispielsweise können Klimagase wie Methan (CH₄) oder Schadstoffe wie Formaldehyd (CH₂O) gemessen werden. Dadurch ist ein erweiterter Benchmark für Kraftstoffe möglich, der über die bisher reglementierten Schadstoffe hinausgeht. Die Auswertemethodik des FTIR muss dafür an den jeweiligen Kraftstoff angepasst [17, 32] und für diesen validiert werden. Um die Forschungsfrage zu beantworten, wird ein FTIR am Prüfstand aufgebaut und eine Auswertemethodik entwickelt. Zusätzlich werden Standardanalysatoren und Partikelmesstechnik verwendet, um die Schadstoffemissionen der synthetischen Kraftstoffe sowie die folgenden Motoroptimierungen zu bewerten.

- 2) Inwiefern können moderne Einspritztechnologien genutzt und adaptiert werden, um die Motorperformance und den Schadstoffausstoß für die Kraftstoffe C65F35/MeOH sowohl unter normalen Betriebsbedingungen als auch während des Kaltstarts zu verbessern?

Aktuelle Einspritzsysteme, welche beispielsweise auf die Nutzung von 35 MPa Kraftstoffdruck in Kombination mit Mehrfacheinspritzungen zurückgreifen, wurden speziell für Benzin entwickelt [36–41]. Für C1-Oxygenate ist dieser Stellhebel zur Minimierung von Schadstoffemissionen weitgehend unerschlossen. Das Potenzial einer angepassten Einspritzstrategie wird im betriebswarmen Motorzustand und unter Kaltstartbedingungen evaluiert. Neben einer Anpassung der Motorsteuerung ist es zielführend, auch die kraftstoffführende Hardware an die Eigenschaften der synthetischen Kraftstoffe anzupassen [42]. Um zu ermitteln, ob eine seitliche oder zentrale Injektorlage vorteilhaft ist, wird die Injektorposition im Zylinderkopf variiert. Zusätzlich werden zwei kraftstoffangepasste Injektoren bei verschiedenen Kraftstoffdrücken untersucht. Die Effizienz lässt sich durch die Einspritzstrategie positiv beeinflussen [40], allerdings kann der Wirkungsgrad für die Oxygenatkraftstoffe durch eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses effektiver gesteigert werden [34, 43].

- 3) Welche Auswirkungen hat der Einsatz eines erhöhten Verdichtungsverhältnisses von bis zu $\varepsilon \sim 20$ auf die Motoreffizienz und die Schadstoffemissionen von Motoren, die realitätsnah mit C1-Oxygenaten betrieben werden sollen?

Ein angepasster Kolben mit einem Verdichtungsverhältnis von 19,6 wird in Versuchen eingesetzt, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad darzustellen sowie die Klopfestigkeitsannahmen von Simulation [44] und vorangegangenen Messungen [45] zu belegen. Die Kolbenversuche werden mit der zuvor untersuchten Mehrfacheinspritzungen ergänzt, um beide Optimierungsmaßnahmen zu kombinieren. Erkenntnisse werden auf den dynamischen Betrieb mit optimierten Serienmotor übertragen.

Die Datengrundlage zur Beantwortung der Forschungsfragen bilden Messungen an einem Einzylinder-Forschungsmotor, die zusätzlich mittels 0D/1D-Simulation analysiert werden. Optische Messungen in einer Spraykammer und Messungen an einem Einspritzverlaufsindikator-Prüfstand werden ergänzend verwendet. Mit diesen kann die Kernkomponente Injektor sowie das Sprayverhalten verschiedener Kraftstoffe genauer untersucht werden. Weiterführende Messungen mit einem Vierzylindermotor werden durchgeführt, um die Übertragbarkeit der Einzylinder-Ergebnisse auf den realen Fahrbetrieb sicherzustellen.

1.3 Struktur der Arbeit

Im **Kapitel 2** „Stand der Technik“ werden die theoretischen Grundlagen der Effizienzsteigerung sowie der Schadstoffentstehung, -zusammensetzung und -messung beschrieben. Schlüsseltechnologien und Entwicklungstrends werden präsentiert, die benzinoptimierte PKW-Motoren dazu befähigen ihren Wirkungsgrad zu steigern und ihren Schadstoffausstoß zu minimieren. Des Weiteren wird hervorgehoben, dass durch einen Einsatz von synthetischen Kraftstoffen weitere Fortschritte in beiden Bereichen möglich sind. Aus dem wissenschaftlichen Kontext werden die Ziele dieser Arbeit abgeleitet.

Das **Kapitel 3** „Methode“ beginnt mit der Vorstellung der Versuchsträger. Hauptaugenmerk ist auf den Einzylinder-Forschungsmotor und dessen notwendige Weiterentwicklungen gelegt. Basierend auf den realitätsnahen Messdaten des Vierzylindermotors werden die Betriebspunkte für die Versuche am Einzylindermotor abgeleitet. Es folgt ein Überblick über die Messdatenerfassung und -aufbereitung. Das Kapitel endet mit der Vorstellung des zum Einzylindermotor gehörenden Modells zur Druckverlaufsanalyse.

Als erstes Forschungsergebnis wird in **Kapitel 4** die Anpassung der FTIR-Methode an die Kraftstoffe präsentiert. Die validierte FTIR-Methode bildet die Grundlage für die Bewertung von Schadstoffemissionen im Rahmen der Optimierung von Motorsteuerung und -konstruktion. Das zweite Ergebnis stellt die modifizierte Einspritzsteuerung für einen auf Betriebstemperatur erwärmten Motor dar. Im dritten Unterkapitel werden die Ergebnisse unter Kaltstartbedingungen vorgestellt. Im Anschluss werden die konstruktiven Anpassungen behandelt, wobei die Potenziale von dedizierten Injektoren und einer zentralen Injektorposition aufgezeigt werden. Das letzte Unterkapitel widmet sich den Versuchen mit erhöhtem Verdichtungsverhältnis.

In **Kapitel 5** werden die Ergebnisse im Kontext der aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet diskutiert und im Hinblick auf die formulierten Forschungsziele erörtert. „**Zusammenfassung**“ und „**Ausblick**“ runden die vorliegende kumulative Dissertation ab.

2 Stand der Technik

2.1 Entwicklungsziele für moderne Ottomotoren in Personenkraftwagen

2.1.1 Wirkungsgradsteigerung

Theoretische Grundlagen

Die Wirkungsgradsteigerung bleibt getrieben durch die Klimaproblematik ein primäres Ziel der Motorenentwicklung [46–49].

Mit Hilfe des Gleichraumprozesses kann der thermodynamisch ideale Prozess eines Ottomotors beschrieben werden. Die Stellhebel zur Kraftstoffverbrauchssenkung können anhand dieses Prozesses erklärt werden. Im Gleichraumprozess wird ein ideales Gas isentrop verdichtet, anschließend erfolgt eine isochore Wärmezufuhr und eine isentrope Expansion. Der Zyklus endet mit einer isochoren Wärmeabfuhr. Der Wirkungsgrad (η_{GR}) dieses Prozesses stellt den maximal möglichen Wert unter idealisierten Bedingungen dar. Wie in der nachfolgenden Gleichung dargestellt, ist der Wirkungsgrad abhängig vom geometrischen Verdichtungsverhältnis (ϵ) des Motors und dem Isentropenexponenten (κ) des Arbeitsmediums.

$$\eta_{GR} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \quad (2.1)$$

Beide Stellgrößen haben nicht nur einen Einfluss auf den idealisierten Vergleichsprozess, sondern sind auch für einen technisch realisierbaren Motor entscheidend. Zur Maximierung des Wirkungsgrades ist ein hohes Verdichtungsverhältnis zu wählen. Das Verdichtungsverhältnis ist im realen Motor begrenzt durch den gleichermaßen zunehmenden Druckanstieg während der Kompression. Dieser führt zu einer höheren Bauteilbelastung, sowie zu steigenden thermischen und reibungsbedingten Verlusten. Zudem steigt abhängig vom Kraftstoff die Gefahr von potenziell motorschädigenden Verbrennungsanomalien, beispielsweise der klopfenden Verbrennung.

Die zweite direkte Stellgröße ist der stoffabhängige Isentropenexponent. Luft hat in erster Näherung einen Isentropenexponenten von 1,4 [50]. Im realen Arbeitsprozess findet die Wärmezufuhr durch die Verbrennung eines Kraftstoffluftgemischs statt. Die Beimischung von Kraftstoff reduziert den Isentropenexponenten und verringert damit den maximal darstellbaren Wirkungsgrad [51, 52]. Der Isentropenexponent ist vom Kraftstoff-Luftverhältnis abhängig. Das Verbrennungsluftverhältnis (λ), siehe Formel 2.2, beschreibt als Kennzahl den Zusammenhang zwischen Kraftstoff, Luft und stöchiometrischen Mindestluftbedarf (L_{min}). Der Mindestluftbedarf gibt an, wieviel Luft relativ zum Kraftstoff benötigt wird, um diesen vollständig zu verbrennen.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{Luft}}{\dot{m}_{Kraftstoff} * L_{min}} \quad (2.2)$$

Arbeitet ein Motor mit Luftüberschuss ($\lambda > 1$), wird die Verbrennung als mager bezeichnet. Eine fette Verbrennung hingegen findet unter Luftmangel statt, was zwangsläufig zu einer unvollständigen Oxidation des Kraftstoffs führt. Im wirklichkeitsgetreuen Motor ist die Verbrennung auch im stöchiometrischen Betrieb und bei Luftüberschuss unvollständig. Im Abgasstrom ist un- oder teilverbrannter Kraftstoff enthalten, was Effizienzverluste bedingt. In Abbildung 1 sind die Verluste eines realen Motors dargestellt. Als Grundlage der Abbildung dienen Messdaten des Einzylinder-Forschungsmotors und eine Druckverlaufsanalyse. Auf weitere, für diese Arbeit besonders relevante Verluste wird nachfolgend eingegangen.

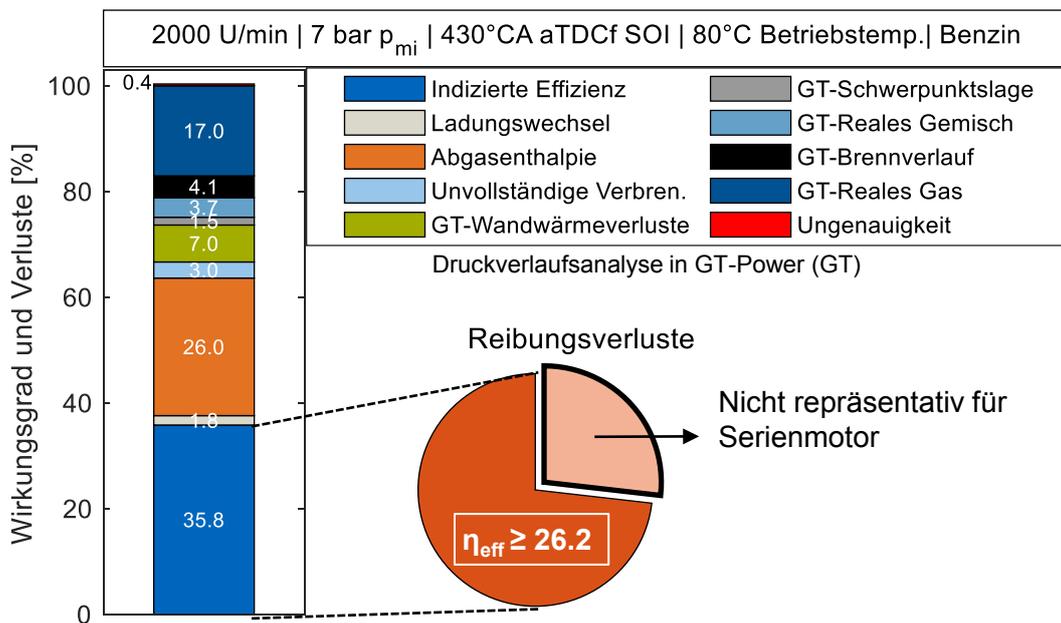


Abbildung 1: Verlustteilung am Referenzpunkt des Einzylinder-Forschungsmotors

Ein realer Motor ist kein geschlossenes System; es treten Ladungswechsel- und Leckageverluste auf. Eine ladungswechselzugehörige Kenngröße ist der Liefergrad. Dieser beschreibt die beim Einlassschluss gefangene Ladungsmasse im Verhältnis zur theoretisch möglichen Zylinderfüllung. Mit dieser kann die Effektivität der Ansaugung bewertet werden. Im Anhang, siehe Abbildung 27, wird deutlich, dass über die Kraftstoffzufuhr der Liefergrad verbessert oder beeinträchtigt werden kann.

Das heiße Abgas ist ein Hauptbestandteil der Verluste. Weitere Wärmeverluste treten über die Brennraum begrenzenden Bauteile auf, sogenannte Wandwärmeverluste.

Im Straßenverkehr geht etwa ein Viertel der im Kraftstoff enthaltenen Energie durch Reibungsverluste verloren [53]. Die Reibungsverluste des Einzylindermotors sind nicht repräsentativ für einen Serienmotor im Fahrzeug. Am Einzylindermotor werden Zusatzaggregate wie Öl-, Kraftstoff- und Wasserpumpe nicht berücksichtigt. Der Massenausgleich und der Kurbeltrieb führen im Vergleich zu einem Serienmotor zu mehr Reibung.

Die nicht instantane Wärmefreisetzung ist mit Verlusten verknüpft. Die Wärmefreisetzung wird über den Brennverlauf charakterisiert, welcher die Umsetzung der im Kraftstoff enthaltenen Energie in Wärme beschreibt. Neben einer möglichst schnellen Verbrennung ist die Lage der

Energieumsatzpunkte entscheidend. Der Verbrennungsschwerpunkt beschreibt den Zeitpunkt, zu dem 50% der im Kraftstoff enthaltenen Energie umgesetzt sind. Idealerweise liegt dieser im realen Motor etwa 8° Kurbelwinkel ($^\circ\text{CA}$) nach dem oberen Zündtotpunkt [50].

Der Motor ist in Richtung Kurbelgehäuse nicht perfekt geschlossen, wodurch Leckageverluste über die Kolbenringe auftreten. Diese werden als Blow-By bezeichnet.

Entwicklungstrends zur Wirkungsgradsteigerung

Um die Effizienz in PKW-Ottomotoren zu steigern, werden aktuell zwei verschiedene Strategien verfolgt [46, 54], siehe Abbildung 2.

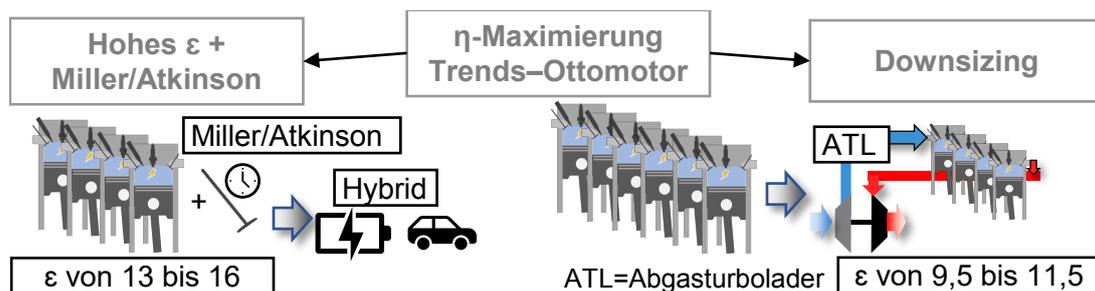


Abbildung 2: Entwicklungsstrategien zur Wirkungsgradsteigerung

Größere, meist nicht aufgeladene Motoren nutzen höhere geometrische Verdichtungsverhältnisse in Kombination mit Miller/Atkinson-Steuerzeiten, um den Wirkungsgrad zu steigern. Diese Steuerzeiten verringern die Füllung und Klopfneigung, indem sie die Luftansaugung zeitlich begrenzen. Die Expansion wird nicht verändert, wodurch das höhere geometrische Verdichtungsverhältnis zu einem gesteigerten Wirkungsgrad führt [55]. Dieses Konzept wird primär in Hybridanwendungen mit geometrischen Verdichtungsverhältnissen von 13-16 verwendet [56–59], wengleich es auch in nicht hybriden Antriebssträngen bereits in Serie ist [60]. In den erwähnten Publikationen werden maximale effektive Wirkungsgrade um 40% erreicht.

Downsizing, im rechten Teil der Abbildung 2 dargestellt, beschreibt die Verwendung von hubraumreduzierten Motoren. Die angeforderte spezifische Last wird erhöht, wodurch sich Drosselverluste minimieren lassen. Die nahezu lastunabhängigen Reibungsverluste haben einen geringeren Einfluss auf den Wirkungsgrad. Um die geforderte Leistungsdichte darstellen zu können, benötigen derartige Motoren Aufladesysteme. Der Abgasturbolader stellt das Standardsystem dar. Mit diesem kann ein Teil der Abgasenthalpie nutzbringend verwendet werden, um ausreichend Frischluftmasse in den Brennraum zu fördern. Das zweite Konzept zeichnet sich durch höhere spezifische Motorleistungen mit geringeren maximalen Wirkungsgraden ($\sim 37\%$ [61]) aus. Dafür sind weitere Bereiche des jeweiligen Kennfelds mit hohem Wirkungsgrad darstellbar. Die Wirkungsgradeinbußen lassen sich mit dem vergleichsweise niedrigeren Verdichtungsverhältnis korrelieren. Aktuelle performante Downsizing-Motoren besitzen je nach Hersteller und Anwendung ein Verdichtungsverhältnis zwischen 9,5 und 11,5 [43, 62–64]. Alle in diesen Quellen verwendete Motoren nutzen einen Abgasturbolader.

Durch weitere Maßnahmen, wie beispielsweise der Abgasrückführung [60, 65–68], dem Einsatz variabler Ventilsteuerzeiten [69, 70] oder der Minimierung der Reibung [53, 71–73], lässt sich der motorische Wirkungsgrad weiter steigern. Magerbrennverfahren in Kombination mit Hochenergiezündsystemen [51, 68, 74, 75] werden aufgrund entscheidender Nachteile für das zweite zentrale Entwicklungsziel, „minimale Schadstoffemissionen“, nicht weiter behandelt.

2.1.2 Reduktion von Schadstoffemissionen

Theoretische Grundlagen

Die typische Zusammensetzung des Rohabgases eines mit Benzin betriebenen Ottomotors ist in Abbildung 3 dargestellt. Ein Großteil des Abgases besteht aus Stickstoff, Sauerstoff und dampfförmigem Wasser. Diese sind weder signifikant klimaschädlich noch toxisch.

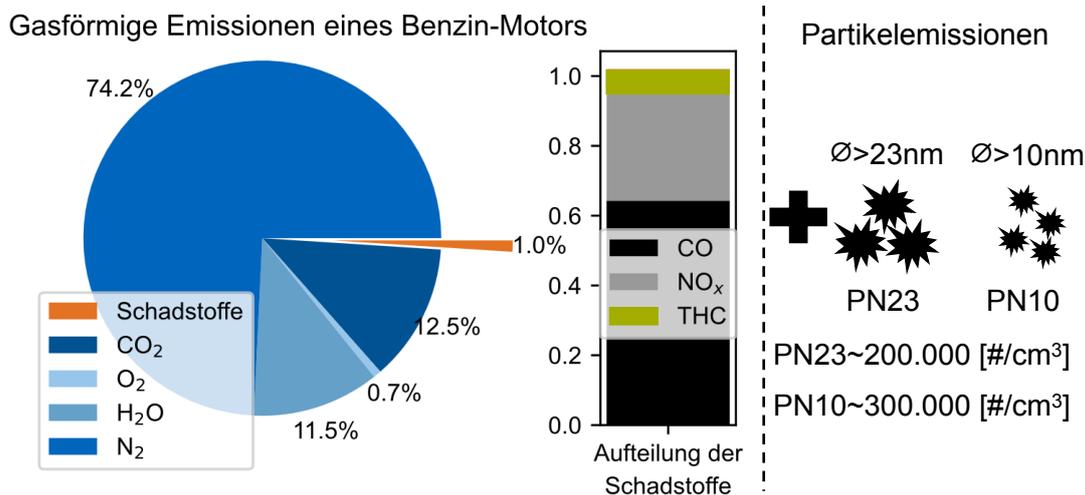


Abbildung 3: Abgaszusammensetzung eines PKW-Ottomotors, gasförmige Bestandteile nach [50], Werte überprüft, ergänzt und angepasst an Motormessdaten

Beim Verbrennen von Benzin entsteht zirka ein Volumenprozent an gasförmigen Schadstoffen. Die Schadstoffe sind primär Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (THC). Die Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO) befürworten eine strenge Reglementierung, um Gesundheitsrisiken für den Menschen zu vermeiden [76]. In Europa forderte die EU-Kommission [77–80], unter Berücksichtigung der Empfehlungen des CLOVE-Konsortiums [81, 82], eine weitere Verschärfung der Schadstoffgrenzwerte und eine zusätzliche Reglementierung bisher nicht berücksichtigter Schadstoffe.

Bei kraftstoffunabhängiger Betrachtung werden THC-Emissionen als volatile organische Verbindungen (VOC) definiert, um sauerstoffhaltige Verbindungen zu berücksichtigen [17, 83]. Über die Kraftstoffzusammensetzung (H/C-Verhältnis) kann der Anteil an Wasser und CO₂ im Abgas beeinflusst werden. Die Kettenlänge und der Sauerstoffanteil (bzw. das O/C-Verhältnis) ist mitentscheidend dafür, welche Moleküle bei der unvollständigen Oxidation im Abgas auftreten. Verbrennt beispielsweise ein kurzkettiger, sauerstoffhaltiger Kraftstoff, sind keine signifikanten Mengen von langkettigen HC-Spezies (C₅H_x-C₈H_x) im Abgas zu erwarten [84].

Im Vorschlag der EU-Kommission zur Euro-7 Gesetzgebung [77, 78] wurden neben den VOC-Emissionen auch Einzelspezies wie CH₄ und CH₂O berücksichtigt. CH₄ ist ein Treibhausgas, das über einen Zeitraum von 20 Jahren nach dem Ausstoß etwa 80 mal stärker wirkt als CO₂ [85]. CH₂O ist krebserzeugend und wie CH₄ ein Vorläufer von Ozon/Smog [86, 87]. CH₂O zählt zur Gruppe der Aldehyde und ist besonders relevant für methanolhaltige Kraftstoffe [86].

Zusätzlich zu den gasförmigen Emissionen werden gesundheitsschädliche Festkörperpartikel ausgestoßen, welche über die Partikelanzahlkonzentration (PN) und die Partikelmasse (PM) bewertet werden [88]. Die Partikel können nach Größe unterteilt werden. In der Euro-6 Gesetzgebung werden die Partikel bis zu einem minimalen Durchmesser (PN23) von 23 nm für

direkteinspritzende Ottomotoren reglementiert [89]. Da auch kleinere Partikel mit erheblichen Gesundheitsrisiken verbunden sind [76], waren im Vorschlag der EU-Kommission für die Euro-7 Norm Partikel bis 10 nm Durchmesser (PN10) berücksichtigt [77, 78]. Partikelemissionen können auch nach ihrer Volatilität unterteilt werden. In der Gesetzgebung werden ausschließlich feste, nicht volatile Partikel berücksichtigt [90].

Im Vorschlag der EU-Kommission zur Euro-7 Norm sollten des Weiteren der Ausstoß sekundärer Schadstoffe wie Distickstoffmonoxid (N₂O) und Ammoniak (NH₃) reglementiert werden [77, 78]. Damit würde die EU dem Beispiel der amerikanischen Umweltschutzbehörde (EPA) Tier 3 Gesetzgebung für N₂O folgen [91]. Der Einfluss von einem Kilogramm N₂O auf die Klimaerwärmung ist in etwa 300 mal stärker als der von einem Kilogramm CO₂ [91]. NH₃ ist ein giftiges Gas und ein Partikelvorläufer. Sowohl in den USA als auch in Europa existieren Konzentrationsgrenzwerte für die Umgebungsluft [92]. NH₃ und N₂O entstehen primär während der Abgasnachbehandlung und weniger während der Verbrennung von Benzin [91–93].

Die grundlegenden Entstehungsmechanismen, der Reglementierungsgrund und die zugehörige Literatur sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Schadstoffbestandteile und deren Entstehung/Wirkung

| Schadstoffkomponente | Dominierender Entstehungsmechanismus im Motor bzw. während der Abgasnachbehandlung (AGN) | Toxisch-T THG-G | Literatur |
|--------------------------------|--|----------------------------|------------------|
| NO _x | Hohe Verbrennungstemperaturen (Zeldovich) und Prompt NO Bildung in der Flammenfront (Fenimore) | T | [50, 94, 95] |
| NH ₃ | AGN: Dreiwegekatalysator ($\lambda < 1$) | T | [92, 93, 96] |
| N ₂ O | AGN: Dreiwegekatalysator ($T < T_{\text{light off}}$) | G | [87, 91, 96] |
| CO | Unvollständige Oxidation von Kohlenwasserstoffen durch lokal fettes Gemisch, Wandablöschung-temperaturabhängig | T | [50] |
| THC/VOC | Unvollständige Verbrennung durch lokal fettes Gemisch, Wandablöschung, Kraftstoffablagerung, Zündaussetzer... | T | [50] |
| →C ₆ H ₆ | Unvollständige Benzinverbrennung | T | [84, 97] |
| →CH ₄ | Unvollständige Verbrennung von Benzin oder Oxygenat | G+T | [43, 84, 87] |
| →CH ₂ O | Unvollständige Oxygenatverbrennung, (Kaltstart Benzin) | T | [16, 84, 87, 98] |
| PN _{23/10} | Unvollständige Verbrennung und Verunreinigung durch Verschleiß, Öl, Additive, angesaugte Luft... | T | [88, 89, 99] |

Schlüsseltechnologien zur Schadstoffminimierung

Ein Überblick über die verschiedenen Systeme der Abgasnachbehandlung ist in Abbildung 4 gezeigt. Das schadstoffbelastete Rohabgas, in Rot dargestellt, enthält NO_x, CO, VOC und Partikel. Mit innermotorischen Maßnahmen können diese zwar reduziert, aber nicht vollständig vermieden werden. Daher verwenden aktuelle, Euro-6d konforme PKW einen Dreiwegekatalysator (TWC) und einen Otto-Partikelfilter (OPF), um die Rohemissionen eines Benzinmotors zu reinigen [62, 100]. Der TWC ist in der nachfolgenden Abbildung in grün skizziert, während der OPF in schwarz gezeichnet ist. Sowohl TWC als auch OPF erhöhen den Abgasgedruck und

oder die Anfettung mit zusätzlicher Sekundärlufteinblasung [111]. Aktuelle Fahrzeugkonzepte mit niedrigsten Schadstoffemissionen verwenden neben den innermotorischen Maßnahmen zur Unterstützung der Abgasnachbehandlung weitere zusätzliche Hilfsaggregate. Vielversprechend zur schnelleren Konvertierung aller Schadstoffe sind elektrische Katalysator-Heizer oder zusätzliche Kraftstoffbrenner im Abgasstrang [106, 112].

Ältere Motorengenerationen verwendeten im Hochlastbereich eine Lastanfettung ($\lambda < 1$) mit dem Ziel, Bauteiltemperaturen zu reduzieren und somit thermisches Versagen von Kolben, Ventilen oder Turboladern zu verhindern. Das zusätzlich eingespritzte Benzin, das aufgrund des Sauerstoffmangels nicht vollständig verbrannt werden kann, wird zur Bauteilkühlung verwendet. Diese Maßnahme verhindert eine effektive Konvertierung der zusätzlich erhöhten THC- und CO-Emissionen. Außerdem wird im Katalysator aufgrund des Sauerstoffmangels NH_3 gebildet. Viele Hersteller verzichten für aktuelle Motoren auf diesen Stellhebel und verwenden im gesamten Kennfeld strikt $\lambda = 1$ [56, 57, 62, 113, 114].

Eine Schlüsseltechnologie, die die erhöhten Bauteiltemperaturen reduziert, ist die Direkteinspritzung (DI) [39, 99]. Der Kraftstoff wird in den Brennraum eingespritzt und verdampft dort. Dadurch sinkt die thermische Belastung der brennraumbegrenzenden Bauteile. Um auch die Partikelemissionen auf einem niedrigen Niveau zu halten, ist für die Benzindirekteinspritzung ein hoher Kraftstoffdruck notwendig [88]. Aktuelle Motorenkonzepte nutzen vermehrt 35 MPa Kraftstoffdruck für die eingesetzten DI-Systeme [56, 57, 62, 63, 114, 115] mit optionaler zusätzlicher Saugrohreinspritzung für den Niedriglastbereich [60, 62]. Der hohe Kraftstoffdruck bedingt Pumpverluste, kann jedoch die Ladungsbewegung verbessern und somit den Wirkungsgrad steigern. Ergänzt werden kann der hohe Kraftstoffdruck mit Mehrfacheinspritzungen, um vor allem Partikelemissionen zu reduzieren und idealerweise gleichzeitig den Wirkungsgrad zu verbessern [59, 63, 116–118]. Für Katalysatorheizstrategien und Partikelreduktion im Kaltstart ist ein hoher Kraftstoffdruck in Kombination mit Mehrfacheinspritzungen zielführend [36, 115]. Mehrfacheinspritzungen sind mit einem erhöhten Applikationsaufwand und gesteigerten Anforderungen an das Injektordesign verbunden. Forschungsergebnisse am Einzylinder zeigen, dass durch einen geeigneten, modellbasierten Controller der Applikationsaufwand gesenkt werden kann [110, 119, 120].

Beide Entwicklungsziele kombiniert, sprich maximale Effizienz bei minimalem Schadstoffausstoß, sind maßgebend für eine weiterentwickelte Motorengeneration. Gleichzeitig ist eine Transformation von fossilem Benzin auf eine nachhaltige Alternative notwendig, die im Idealfall weitere Fortschritte in beiden Bereichen ermöglicht.

2.2 Synthetische Ottokraftstoffe

Bis auf das fossile Referenzbenzin (G100) können alle nachfolgend untersuchten Kraftstoffe durch eine nachhaltige Produktion THG-neutral verwendet werden. Die vereinfachte Grundidee der nachhaltigen, synthetischen Kraftstoffe ist in Abbildung 5 illustriert.

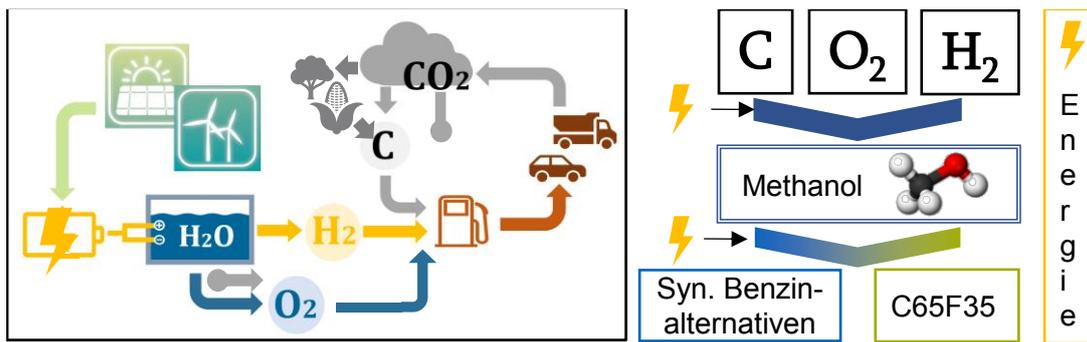


Abbildung 5: Nachhaltige Produktion synthetischer Kraftstoffe, modifiziert nach [121]

Wie auf der linken Seite der Abbildung dargestellt, erfolgt die Kraftstoffherstellung mit erneuerbarer Energie. Über die Elektrolyse wird Wasser in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) aufgespalten. Kohlenstoff wird mittels atmosphärischem Carbon-Capture extrahiert oder durch die Verwendung von Biomasse oder ihren Abgasen gewonnen [27]. Ziel ist es, einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf zu realisieren.

In weiteren energiebehafteten Prozessschritten, in Abbildung 5 rechts skizziert, können dann aus den Grundbausteinen die verwendeten Kraftstoffe synthetisiert werden. Methanol ist sowohl Kraftstoff als auch wichtige Plattformchemikalie für weitere, funktionale Kraftstoffe [17].

2.2.1 Normkonforme Benzinalternativen

In Tabelle 2 sind die Kraftstoffdaten der beiden in dieser Arbeit verwendeten, synthetischen Benzine im Vergleich zum zertifizierten Referenzkraftstoff dargestellt. G100 ist DIN EN 228 [122] konformes Benzin mit einer Research Oktanzahl von 95,9 und enthält 5 vol% Ethanol.

P100 ist ein DIN EN 228 konformer und nachhaltig produzierter Kraftstoff [123]. Durch die Normkonformität kann mit der Verwendung eines solchen Kraftstoffes der THG-Einsparhebel der aktuellen Flotte genutzt werden [7, 17, 124]. In RDE-Versuchen an der Technischen Universität (TU) Darmstadt wurde die Alltagstauglichkeit bewiesen. Leicht gestiegene PN-Emissionen im Vergleich zu Tankstellenbenzin wurden nachteilig festgestellt. [123]

Der zweite eingesetzte, normierte Kraftstoff ist Alkylatbenzin (A100) [125], das beispielsweise in kleinmotorigen Arbeitsgeräten wie Motorsägen zum Einsatz kommt [126]. In PKW wird es als sogenannter „Anti-Spark-Fouling“ Kraftstoff zur Erstbefüllung verwendet, um Injektorverkokungen zu minimieren [127]. Alkylatbenzin zeichnet sich durch eine nahezu partikelfreie Verbrennung aus [128], erfüllt aber nicht DIN EN 228 aufgrund einer zu niedrigen Dichte. Ein weiterer Nachteil ist die geringere Klopfestigkeit, die aus der RON ersichtlich wird. Durch seine chemische Zusammensetzung wird es, wie in [129], stellvertretend für ein synthetisch hergestelltes Benzin ohne Additivierung verwendet. Synthetische Fischer-Tropsch Benzine bestehen, wie das Alkylat-Benzin, aus hauptsächlich wenig klopfesten Alkanen und Olefinen [130]. Erste Versuche mit klopfestigkeitssteigernden Additiven, wie beispielsweise den C1-Oxygenaten, verdeutlichen das Potenzial für eine Nutzung im PKW [131].

Tabelle 2: Kraftstoffdaten der normkonformen Benzinalternativen, modifiziert nach [132]

| | Einheit | G100 | P100 | A100 |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------|------------|-------------|
| Norm | - | DIN EN 228 | DIN EN 228 | DIN 51641 |
| Unterer Heizwert | MJ/kg | #42,2 | #41,6 | #44,8 |
| Dichte @ 15°C | kg/m ³ | *750,2 | *761,5 | *687,1 |
| Benzinäquivalent | m ³ /m ³ | 1 | 1,00 | #1,02 |
| RON/MON | | *95,9/85,8 | *97,0/86,0 | *94,3/91,8 |
| Sauerstoffanteil | m. % | *1,9 | *3,7 | *<0,01 |
| Wasserstoffanteil | m. % | *13,3 | *13,6 | *16,04 |
| Kohlenstoffanteil | m. % | *84,9 | *82,8 | *83,96 |
| Mindestluftbedarf (=stöchiometrisch) | kg/kg | #14,23 | #14,1 | #15,2 |
| Siedebereich | °C | "37,5-202,5 | -210 | *28,5-192,5 |
| DVPE @ 37,8 °C | kPa | *59,8 | *50,0 | *63,8 |
| Verdampfungsenthalpie | kJ/kg | "420 | | |
| Datenblätter auf Seiten | - | 89,90 | 93,94 | 91,92 |

*Datenblätter, # berechnet, "Literatur

Experimentelle Untersuchungen der Benzinalternativen

Während der Herstellung eines normkonformen Kraftstoffs kann die Formulierung verbessert werden. Kulzer et al. untersuchten die Einflüsse des Olefinegehalts, des Aromatengehalts und der Volatilität verschiedener Benzinkomponenten [25]. Vielversprechende Kraftstoffformulierungen wurden abgeleitet und am Einzylindermotor getestet. Zwei optimierte Kraftstoffe wurden im Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC) mit einem aktuellen Fahrzeug (Porsche 911-Typ 991 2) und mit einem älteren PKW untersucht. Mit dem modernen, direkteinspritzenden Motor wurden der PN-Ausstoß um ~75% und die CO₂-Emissionen um ~2% reduziert, während die NO_x-Emissionen um 5% anstiegen. Gleichzeitig war auf Basis der Einzylinderversuche zu erwarten, dass durch eine Motor- und Steuerungsanpassung ein Effizienzvorteil umgesetzt werden könnte. Die Kaltstartversuche am Einzylinder wurden durch weitere Versuche mit Sekundärlufteinblasung ergänzt [133]. Die für die zweite Versuchsreihe verwendeten Kraftstoffformulierungen basierten auf fossilen Rohstoffen. Auch unter Kaltstartbedingungen zeigte sich für eine verbesserte Kraftstoffformulierung ein Schadstoffvorteil gegenüber dem Referenzkraftstoff.

Ähnlich wie Kulzer testeten auch Rüggeberg et al. einen Ersatzkraftstoff, der durch eine höhere Oktanzahl (RON=103,7) und einen niedrigeren finalen Verdampfungspunkt (135°C) die Verbrennungseigenschaften verbesserte [26]. Zwei Lastpunkte im stationären Betrieb wurden am Vollmotor erprobt. Die maximale Effizienz konnte um 1,4 %abs gesteigert werden. Bei 3000 U/min, 12 bar p_{me} wurden die THC-Emissionen um 36,5% reduziert.

Im wissenschaftlichen Diskurs wurden weitere normkonforme Kraftstoffe mit unterschiedlichen Motoren getestet und diskutiert [112, 123, 127, 134–139]. In der Mehrzahl der Studien konnten nur geringfügige Effizienzsteigerungen oder Schadstoffreduktionen durch das synthetische Benzin erreicht werden. Dies lässt sich durch die strengen Grenzen der Norm erklären. Einige Kraftstoffformulierungen zeigten vernachlässigbare Unterschiede hinsichtlich des Schadstoffverhaltens, wie getestet am Einzylindermotor in [136] oder am Vollmotor in [112]. In

[134] wurde ein Benzin vorgestellt, das zwar eine Schadstoffreduktion von bis zu 15% ermöglichte, allerdings keinen Einfluss auf die motorische Effizienz hatte. Gleichzeitig scheinen signifikante Vorteile hinsichtlich aller reglementierter Schadstoffe und eine signifikante Effizienzsteigerung schwer umsetzbar. Beispielsweise führt ein gesteigerter Anteil an Aromaten im Kraftstoff zu einer hohen Oktanzahl [140]. Mit der Beimischung dieser giftigen, langkettigen Moleküle mit Kohlenstoffdoppelbindung steigen die PN-Emissionen an [50, 97, 141]. Eine gesteigerte RON/MON ohne erhöhten Aromatengehalt ist zwar umsetzbar [127], allerdings veranschaulicht der PN-Klopf Trade-off die Herausforderung, einen deutlich verbesserten Kraftstoff innerhalb der Norm zu formulieren.

Die in Pilotanlagen favorisierte Herstellung von synthetischem, normkonformen Benzin basiert auf Methanol (MeOH, M100) als Ausgangsstoff [21, 127, 136, 142]. Ein zusätzlicher Energieaufwand in der Produktionsanlage ist notwendig, um den Kraftstoff ausgehend von MeOH zu erzeugen [136]. MeOH ist bereits ein vielversprechender Kraftstoff, welcher als Plattformchemikalie großtechnisch vorhanden ist [143].

2.2.2 C1-Oxygenatkraftstoffe: Methanol und C65F35

MeOH zählt zu den C1-Oxygenatkraftstoffen, die aus motorischer Sicht vielversprechend für den Einsatz in Verbrennungsmotoren sind, wenngleich einige Nachteile den Einsatz in Europa bisher verhindern [16, 17, 32]. Weitere Stellvertreter dieser Stoffgruppe sind Dimethylcarbonat (DMC) und Methylformiat (MeFo) sowie Mischungen aller drei Komponenten (C_xF_xM_x). „Xx“ repräsentiert dabei den Anteil der jeweiligen Komponenten im Kraftstoff in Volumenprozent. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Kraftstoffe sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Materialverträglichkeit der Oxygenate ist hinsichtlich Elastomeren nicht gegeben [17, 144]. Die Energiedichte ist im Vergleich zu Benzin in etwa halbiert. Die geringere Energiedichte sowie die fehlende Elastomerverträglichkeit bedingen, dass die Kraftstoffzufuhr in den Brennraum angepasst werden muss [42, 145]. Folglich sind die Oxygenatkraftstoffe nicht flottenkompatibel.

Diesen Nachteilen stehen viele Vorteile gegenüber. Politisch betrachtet kann die Verwendung von Oxygenatkraftstoffen unabhängiger von Ölimporten machen, was in China zur Markteinführung von MeOH als Kraftstoff führt [146]. Zudem können synthetische Kraftstoffe als flexibler Pufferspeicher im Energiesystem dazu dienen, jahreszeitabhängige Schwankungen in der Produktion von Wind- und Solarenergie auszugleichen. Die gute Transportier- und Speicherbarkeit der Oxygenatkraftstoffe ermöglicht den Aufbau von nachhaltigen Energiesicherheitsreserven für Notfalleinsparungen. Wie fossiles Rohöl können flüssige, synthetische Kraftstoffe über einem globalisierten Markt gehandelt werden. MeOH oder C65F35 können somit an Orten mit günstigen Produktionsbedingungen synthetisiert werden und in Märkten mit hohem Energiebedarf eingesetzt werden. [17] Neben einer verbesserten Umweltverträglichkeit ist ein geringes Gesundheitsrisiko für Oxygenatkraftstoffe möglich [32]. Anders als für MeOH oder Benzin ist für DMC und MeFo keine GHS-Gefahrstoffkennzeichnung für Gesundheit, Toxizität oder Umwelt notwendig [28].

Die Oktanzahl verdeutlicht die höhere Klopfestigkeit der drei Oxygenate im Vergleich zu Benzin und lässt auf Vorteile für die motorische Effizienz schließen [16, 32]. Auch in Kraftstoffmischungen mit Benzin kann diese ausgenutzt werden [131, 147]. Im Hochlastbereich kann somit auf eine verlustbehaftete Spätverschiebung des Verbrennungsschwerpunkts zur Klopfreduktion verzichtet werden. Mögliche Motoranpassungen werden später erläutert.

Tabelle 3: Untersuchte synthetische Kraftstoffe/Blendbestandteile, modifiziert nach [148]

| | Einheit | G100 | DMC | MeFo | M100 | C65F35 |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------|----------|----------|---------|------------|
| Gasoline RON95 E5 | | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dimethyl Carbonate | vol. % | 0 | 100 | 0 | 0 | *64,3 |
| Methyl Formate | | 0 | 0 | 100 | 0 | *34,4 |
| Methanol | | 0 | 0 | 0 | 100 | *1,3 |
| Unterer Heizwert | MJ/kg | #42,2 | #15,2 | #15,2 | #20,6 | #15,2 |
| Dichte @ 15°C | kg/m ³ | *750,2 | *1076 | *976 | *790 | *1041,1 |
| Benzinäquivalent | m ³ /m ³ | 1 | #1,86 | #2,10 | #1,93 | #2,00 |
| RON/MON | | *95,9/85,8 | "109/102 | "115/114 | "109/89 | *117/ >120 |
| Sauerstoffanteil | m. % | *1,9 | *53,3 | *53,3 | "50 | *53,3 |
| Wasserstoffanteil | m. % | *13,3 | *6,7 | *6,7 | "12,5 | *6,7 |
| Kohlenstoffanteil | m. % | *84,9 | *40 | *40 | "37,5 | *40 |
| Mindestluftbedarf (=stöchiometrisch) | kg/kg | #14,23 | #4,64 | #4,64 | #6,49 | #4,64 |
| Siedebereich | °C | "37,5-202,5 | "90 | "31,5 | *64,7 | *37,5-94 |
| DVPE @ 37,8 °C | kPa | *59,8 | "10,8 | ">100 | "31 | *57,4 |
| Verdampfungsenthalpie | kJ/kg | "420 | "418 | "464 | "1103 | "433 |
| Datenblätter auf Seiten | - | 89,90 | 96,97 | 96,98 | 95 | 99 |

*Datenblatt, # berechnet, "Literatur

Die Klopffestigkeit wird durch einen hohen Sauerstoffanteil mit fehlenden C-C Bindungen ergänzt. Dadurch verbrennt der Kraftstoff nahezu rußfrei [32]. Als städtisches Umgebungsniveau wird in Anlehnung an [149, 150] eine Partikelanzahlkonzentration von 10^3 - 10^4 #/cm³ angenommen. Ist es möglich, das Abgas des Motors innerhalb dieses Bereichs zu halten, so wird ein Partikelfilter überflüssig. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, ist nicht nur der Kraftstoff, sondern auch das Motoröl beziehungsweise die Interaktion von Kraftstoff und Motoröl eine Partikelquelle. Für Kraftstoffe ohne direkte C-C Bindung scheint das Motoröl die primäre Partikelquelle zu sein [149, 151–153]. Insbesondere der Anteil an Detergent im Motoröl führt zu kleinen Partikeln (<23nm) [154]. Die verringerten PN-Emissionen bei der Verbrennung von MeOH, DMC und MeFo sind durch einen höheren Anteil an sub-23 nm-Partikeln gekennzeichnet [28, 155, 156]. Wie bei Benzin bleibt die PN-Bildung von Motorbetriebspunkt und Design [43, 155, 156] abhängig. Beispielsweise stiegen im Hochlastbereich mit Einfacheinspritzung (17 bar p_{mi} , 2000 U/min, Einspritzstart bei 430°CA aTDCf) die PN-Emissionen für C65F35 von 10^4 auf $\sim 10^5$ #/cm³ [43, 45]. Für MeOH hingegen wurde ein Anstieg der PN10-Emissionen vor allem im Niedriglastbereich in Motorversuchen beobachtet [155, 156].

Die PN-Emissionen steigen über die Lebenszeit eines mit Benzin betriebenen Motors durch die Bildung von Ablagerungen am Injektor. Das Verkoken der Injektoren wirkt sich negativ auf die Spray-Aufbereitung des Kraftstoffs aus [157]. Mit C1-Oxygenaten bilden sich keine Ablagerungen am Injektor, dieser bleibt metallisch blank [45].

Die laminare Flammentemperatur von MeOH ist im Vergleich zu Benzin um 132°C reduziert [16]. Wird zusätzlich der Kraftstoff direkt in den Brennraum eingebracht, reduziert die erhöhte Kraftstoffmenge in Kombination mit der Verdampfungsenthalpie die Brennraumtemperatur

weiter. Dadurch sinkt die temperaturgetriebene NO_x -Bildung während der Verbrennung. Ein ähnliches Verhalten tritt auch für C65F35 auf [44].

Die C1-Oxygenate können mittels Direkteinspritzung dem Brennraum zugeführt werden, um die volumetrische Effizienz im Vergleich zur Saugrohreinspritzung zu steigern [158]. Dafür ist der Einspritzzeitpunkt so zu wählen, dass die über die Ventile einströmende Luft durch den Kraftstoff gekühlt wird. Dadurch kann die Verdampfungsenthalpie genutzt werden, um die im Zylinder gefangene Luftmasse zu erhöhen, siehe dazu Abbildung 27 auf Seite 85.

In der Literatur wurde eine Reduktion der VOC-Emissionen durch die Verwendung von Oxygenatkraftstoffen postuliert [159]. Die VOC-Emissionen ändern jedoch im Vergleich zu Benzin ihre Zusammensetzung [16, 17, 32]. Das liegt daran, dass bei der Verbrennung von Oxygenatkraftstoffen keine langkettigen Kohlenwasserstoffe, sondern kurzkettige, sauerstoffhaltige Moleküle verbrannt werden. Es sind somit weniger langkettige Kohlenwasserstoffverbindungen und gleichzeitig mehr sauerstoffhaltige, kurzkettige Komponenten im Abgas vorhanden. Beispielsweise wurden in Motorversuchen mit C1-Oxygenatkraftstoffen vermehrt Aldehyde, insbesondere Formaldehyd, oder Methan im Abgas gemessen [16, 28, 43, 160]. Die veränderte Zusammensetzung ist bei der Auswahl geeigneter Messgeräte und der Interpretation der Messwerte zu beachten.

Eine Zusammenfassung motorischer Versuche, die die ausgeführten, theoretischen Potenziale unterstreicht, findet sich in [161]. Die zugrundeliegenden Bildungsmechanismen aus Tabelle 1 bleiben in verändertem Umfang für C65F35 und MeOH bestehen. Insgesamt betrachtet führt der Einsatz von C1-Oxygenaten im Vergleich zu Benzin zu einem reduzierten und anders zusammengesetzten Schadstoffausstoß. Um die veränderte Abgaszusammensetzung bewerten zu können, muss diese mittels geeigneter Analysegeräte untersucht werden.

2.3 Abgasmesstechnik für Oxygenatkraftstoffe

In Tabelle 4 sind zur jeweiligen Abgaskomponente die zugehörigen Analysatoren dargestellt. Für die gasförmigen Emissionen CO , CO_2 , NO_x und O_2 können die Standardanalysatoren in Form von Nicht-Dispersiven-InfraRot-Analysatoren (NDIR), Chemilumineszenzdetektoren (CLD) und paramagnetischen Sauerstoffanalysatoren (MPD) verwendet werden. Diese eignen sich zur Untersuchung der Emissionen im Betrieb mit C1-Oxygenatkraftstoffen.

Kritisch zu bewerten ist der Flammenionisationsdetektor (FID), welcher die Gesamtheit der un- und teilverbrannten Kohlenwasserstoffe im Abgas misst und auf den darin gebundenen Kohlenstoff bezieht [16, 162]. Im FID werden alle VOC, die im Abgas des Motors enthalten sind, in einer Wasserstoffflamme oxidiert. Dabei entsteht ein Ionenstrom, der eine hohe Sensitivität gegenüber den meisten Kohlenwasserstoffen aufweist und proportional zur Anzahl der Kohlenstoffatome ist. Es kann über einen Responsefaktor, welcher mittels Referenzgasen kalibriert wird, auf ein Kohlenstoffäquivalent im Abgas zurückgerechnet werden. Kohlenwasserstoffe weisen einen linearen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Kohlenstoffatome und der durch den FID ermittelten Konzentration auf. [162]

Für oxygenathaltige Komponenten ist diese Linearität nicht mehr gegeben. Hier sinkt beispielsweise der Responsefaktor von DMC und MeFo auf $\sim 0,5$ [163]. Gegenüber Formaldehyd ist ein Response mit dem FID kaum messbar [164]. Die Konzentration von DMC im Abgas fließt nur mit halber Gewichtung in das Kohlenstoffäquivalent des FID-Werts mit ein, Formaldehyd bleibt unberücksichtigt. Ein FID kann nicht zwischen verschiedenen

Abgaszusammensetzungen unterscheiden. Somit ist ein direkter Vergleich mittels FID zwischen Abgasen mit und ohne sauerstoffhaltigen Abgaskomponenten nicht aussagekräftig.

Tabelle 4: Abgasanalysemesstechnik zur Bewertung von Oxygenatkraftstoffen

| Abgaskomponente | Messtechnik (MT) | Homologations-relevant? | MT geeignet für Oxygenatkraftstoff? |
|--|------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| CO, CO ₂ | NDIR | Ja | Ja |
| NO/NO _x | CLD | Ja | Ja |
| O ₂ | MPD | Nein | Ja |
| THC | FID | Ja | Nein |
| CO, NO _x , C ₆ H ₆ , CH ₄ , CH ₂ O, NH ₃ , ... | FTIR | Ja, für Euro 7 | Wenn angepasst |
| Partikelanzahl (10 bzw. 23nm) | CPC | Ja (23 nm) | An Auflösungsgrenze |
| Partikelgrößenverteilung | SMPS | Nein | An Auflösungsgrenze |

Dieses Problem kann mittels eines Fourier-Transform-Infrarot-Abgasanalysegeräts (FTIR) gelöst werden. Mit einem FTIR können die VOC-Emissionen differenziert und zeitgleich alle weiteren, reglementierten Schadstoffe gemessen werden [133, 165]. Somit sind die Emissionswerte von VOC wie DMC, CH₂O und MeOH, aber auch Moleküle wie CH₄, NH₃ und N₂O quantifizierbar. Alle Komponenten werden gleichzeitig in einer einzigen Messzelle mit einer hohen Messfrequenz von bis zu 10 Hz detektiert. Um die Konzentration der einzelnen Abgaskomponenten zu ermitteln, nutzt das FTIR elektromagnetische Strahlung in einem Wellenzahlbereich von etwa 400-4000 cm⁻¹. Messbare Komponenten absorbieren infrarote Strahlung in einem charakteristischen Wellenzahlbereich sowie abhängig von der auftretenden Konzentration. Abgasrelevante Moleküle, die prinzipbedingt nicht detektiert werden können, sind N₂, O₂ und H₂. Die Absorption ist abhängig vom elektrischen Dipolmoment, das im jeweiligen Molekül erzeugt werden kann. Absorptionsbereiche verschiedener Moleküle können sich überschneiden. Zwei Grundvoraussetzungen müssen für eine korrekte Konzentrationsbestimmung gegeben sein. Erstens muss eine Bibliothek vorhanden sein, welche die Information über die konzentrationsabhängige Absorption aller signifikanter Komponenten über der Wellenzahl enthält. Zweitens wird eine Methode benötigt, die sicherstellt, dass für jede Komponente ein charakteristischer Bereich evaluiert wird. Alternativ können zusätzliche Bereiche ausgewählt werden, die über Dekonvolution eindeutige Rückschlüsse auf die Konzentrationen der zugehörigen Komponenten zulassen. Sind diese zwei Voraussetzungen erfüllt, werden Querinterferenzen und Missinterpretationen von Spektren vermieden. [165] Neben vorhandenen Laborgeräten werden mobile Emissionsmessgeräte für RDE-Messungen genutzt [166–168]. Bisher ist das FTIR in Europa nicht homologationsrelevant. Es ist zu erwarten, dass sich dies mit der Euro-7 Gesetzgebung ändert [165].

Die Partikelmasse wird für die Homologation in Europa gravimetrisch über einen Filter ermittelt [169]. Messwerte von modernen Fahrzeugen und fossilen Kraftstoffen unterschreiten allerdings die Nachweisgrenze dieser Methode [90]. Zur weiteren Reduktion von Partikelemissionen wurden die PN-Grenzwerte für nichtvolatile Partikel eingeführt [90]. Die PN wird nachfolgend verwendet, um die Partikelemissionen zu bewerten. Die PN wird standardmäßig durch einen CPC (Condensation Particle Counter) ermittelt. Vor der Messung im CPC, wird das Probengas

aufbereitet, indem eine Verdünnung und eine Elimination der volatilen Bestandteile stattfindet. Die Verdünnung ist dabei abhängig davon, in welchem Prüfstandsumfeld das Messgerät arbeitet [28]. Die UN-Regelung Nummer 83 empfiehlt eine Aufbereitung der Probe über eine zweistufige Verdünnung [170].

Wie das Standardverfahren in einem Messsystem umgesetzt werden kann ist im oberen Teil der Abbildung 6 dargestellt. Je nach Anwendungskontext wird entweder Rohabgas oder ein über ein Vollstromverdünnungssystem aufbereitetes Probengas untersucht. Nach der ersten Verdünnung werden die volatilen Bestandteile aus dem Abgas abgeschieden. Der Grundaufbau herkömmlicher Systeme beinhaltet eine auf 350-400°C aufgeheizte Evaporation Tube (ET) und anschließend eine zweite Verdünnungseinheit. Maier zeigte, dass der herkömmliche Aufbau mit ET und zweistufiger Verdünnung robust gegenüber den Abgasen von DMC und MeFo war [28]. Anstatt einer ET kann ein elektrisch beheizter Oxidationskatalysator (catalytic stripper=CS) verwendet werden [171]. Durch die Nutzung eines CS werden die volatilen Bestandteile nicht nur verdampft, sondern umgewandelt und somit entfernt [171, 172]. Im Versuchsaufbau von Gelner [173], der im unteren Teil der nachfolgenden Grafik abgebildet ist, wurde ein CS verwendet. Dadurch konnte auf die zweite Verdünnung verzichtet werden ohne dass volatile Bestandteile detektiert wurden. Mit diesem Aufbau konnten die sehr niedrigen PN-Emissionen des eingesetzten, synthetischen Dieseleratzkraftstoffs präzise gemessen werden.

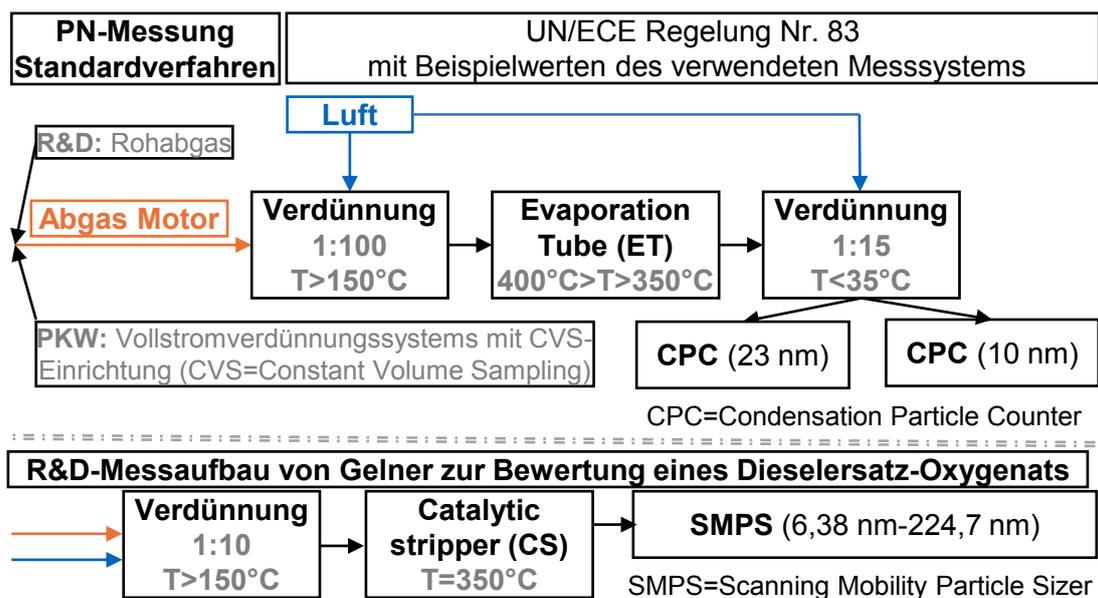


Abbildung 6: Aufbau verschiedener PN-Messsysteme, modifiziert nach [28, 170, 173]

In Forschung und Entwicklung werden neben SPCS-Systemen auch Messgeräte zur Ermittlung der PN-Größenverteilung verwendet, sogenannte SMPS-Messgeräte (Scanning Mobility Particle Sizer) [43, 156, 173–175]. Diese messen, wenn nicht speziell angepasst, ebenfalls verdünntes Abgas. Im Einsatz von Oxygenatkraftstoffen werden PN-Emissionen erreicht, die in der Größenordnung der Umgebung liegen. Auf diesem Niveau ist mit den herkömmlichen Messsystemen eine differenzierte Analyse nur bedingt möglich.

2.4 Motoroptimierungen für Oxygenatkraftstoffe

Optimierungen für einen Motor sind eng verknüpft mit den jeweiligen Kraftstoffeigenschaften. Durch die Klopfbarkeit der Oxygenatkraftstoffe kann ein Verdichtungsverhältnis von über 15 gewählt werden, um eine möglichst hohe Effizienz zu erreichen. Die geringere volumetrische Energiedichte der Oxygenatkraftstoffe bedingt, dass die Einspritzsteuerung und die Injektorkonstruktion weitere wichtige Optimierungsgrößen sind.

MeOH wird bereits seit einigen Jahrzehnten intensiv als Kraftstoff für Verbrennungskraftmaschinen erforscht. Die wichtigsten Motoranpassungen und Motorversuche bis zum Jahr 2019 sind von Verhelst (Lund, Ghent University) et al. zusammengefasst in [16]. DMC und MeFo werden erst seit 2019, beginnend mit [28], intensiver als Kraftstoff für Ottomotoren untersucht. Die Publikation [161] bietet eine umfassende Zusammenfassung sämtlicher Motorenversuche mit DMC und MeFo bis zum Jahr 2020.

2.4.1 Ausgangsbasis für optimierte Motoren

Eine dedizierte Neuentwicklung eines Motors ist ressourcen- und zeitaufwendig. In der Forschung kann daher ein bereits vorhandener Motor als Ausgangsbasis dienen. Grundsätzlich ist sowohl ein Dieselmotor als auch ein Ottomotor zur Verwendung geeignet. Die wichtigsten Argumente für die jeweilige Basis hinsichtlich Ladungsbewegung und Konstruktion sind in Abbildung 7 aufgeführt und werden nachfolgend erläutert.

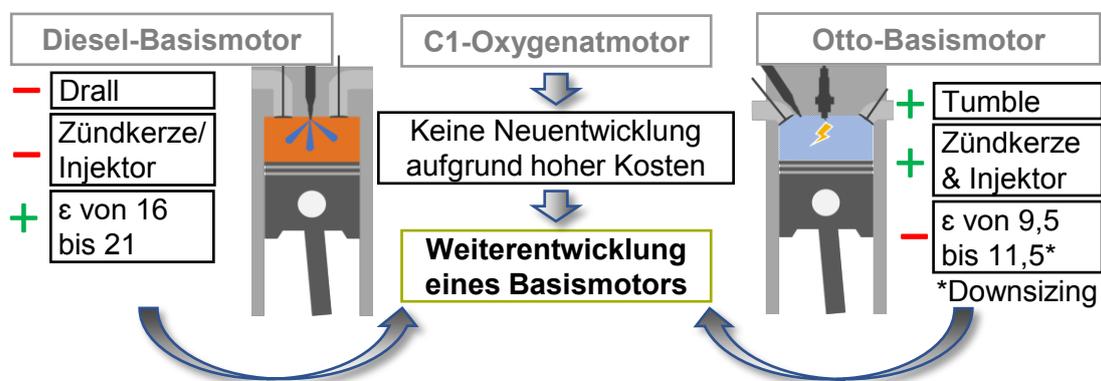


Abbildung 7: Motorentwicklung für C1-Oxygenatkraftstoffe

Diesel-Basismotor

Wenn ein Dieselmotor als Ausgangsbasis dient, sind typischerweise bereits hohe Verdichtungsverhältnisse zwischen 16 und 21 gegeben [105]. Um eine Zündkerze im Zylinderkopf zu installieren, kann die Injektorbohrung verwendet werden. Der Kraftstoff wird dann über eine Saugrohreinspritzung eingebracht. Exemplarisch seien hier die Methanolmotorenversuche von Brusstar (EPA) [176] und Vancoillie (Ghent University) [177] genannt. Beide nutzten einen umgebauten 1,9 l Dieselmotor mit einem Verdichtungsverhältnis von 19,5 als Basis. Effektive Wirkungsgrade von 42% wurden erreicht, allerdings ohne Analyse der Partikelemissionen. Vancoillie nutzte Standardanalysatoren zur Untersuchung der gasförmigen Schadstoffe.

Um die Vorteile der Direkteinspritzung nicht zu verlieren, kann der Diesel-Zylinderkopf um eine Zündkerzenbohrung erweitert werden [178, 179]. Hier sei auf die Ergebnisse von Yang [180] an der Jilin University (U) hingewiesen, der am Motorprüfstand unter anderem die MeOH-

Direkteinspritzung mit einer MeOH-Saugrohreinspritzung verglichen. Die Direkteinspritzung zeigte Vorteile hinsichtlich maximaler Leistung und führte zu einer schnelleren Energieumsetzung [180]. In den Versuchen von Duan [178, 179] mit angepassten MeOH-Motoren wurde zusätzlich der Kolben verändert, um das Verdichtungsverhältnis von 19 auf 15 zu reduzieren. Diese Reduktion wurde in Anlehnung an die Ergebnisse aus [181] getroffen. Ein niedrigeres Verdichtungsverhältnis zeigte neben den geringeren maximalen Zylinderdruckgradienten einen positiven Einfluss auf die Magerlauffähigkeit des eingesetzten Einzylindermotors [181]. Allgemein ist die Gemischaufbereitung im diffusiven Dieselmotorenverfahren grundlegend verschieden zur homogen vorgemischten Ladungsaufbereitung eines klassischen Ottomotors. In Dieselmotoren wird zur Durchmischung ein Wirbel entlang der Zylinderachse erzeugt, der Drall.

Otto-Basismotor

Eine möglichst schnelle und effiziente Verbrennung wird durch eine hohe turbulente kinetische Energie im Zylinder erreicht [59]. Moderne, ottomotorische Brennverfahren nutzen dafür einen Wirbel senkrecht zur Zylinderachse, den sogenannten Tumble [50, 59, 63, 182]. Werden die Oxygenatkraftstoffe im fremdgezündeten Brennverfahren genutzt, ist es naheliegend, ebenso auf ein Tumblekonzept zurückzugreifen. Ein zusätzlicher Vorteil besteht darin, dass der Zylinderkopf konstruktiv nicht modifiziert werden muss, da er bereits über Bohrungen für Zündkerze und Injektor verfügen kann. Das geringere Verdichtungsverhältnis kann beispielsweise über die Anpassung der Kolbengeometrie erhöht werden, wie durchgeführt für Methanol und C65F35 in [43, 51, 183]. Das Kolbendesign hat ebenfalls Einfluss auf die Gemischaufbereitung, allerdings ist es möglich, die prinzipielle Ladungsbewegung beizubehalten [182]. Problematisch ist, dass durch einen Kolbenaufbau der Brennraum zerklüftet wird und der Tumble zusätzlich durch das geringere Kompressionsvolumen beeinträchtigt werden kann [50, 52, 182]. Wird ein Ottomotor als Basis verwendet, muss die veränderte Bauteilbelastung berücksichtigt werden. Beispielsweise steigt der Spitzendruck proportional zum Verdichtungsverhältnis an.

2.4.2 Experimentelle Studien im aktuellen Forschungskontext

Für Methanol wurden Verdichtungsverhältnisse um ~ 20 thermodynamisch untersucht, für C65F35 war das maximal am Prüfstand evaluierte Verdichtungsverhältnis 15 [16, 161]. Eine simulative Optimierung hinsichtlich dedizierten C65F35-Downsizing-Motoren kam zum Schluss, dass für C65F35 ein höheres Verdichtungsverhältnis von 19 vorteilhaft ist [44, 52]. Ob dieses hohe Verdichtungsverhältnis am Motor umsetzbar ist, wurde noch nicht experimentell bestätigt. Voruntersuchungen mit $\epsilon=15$ Kolben und aufgeheizter Ansaugluft am Einzylindermotor legen nahe, dass C65F35 klopfester ist als Methanol und somit $\epsilon\sim 20$ umsetzbar sein sollte [45].

Durch den Einsatz von hohen Verdichtungsverhältnissen oder der Verwendung von aktuellen Serienmotoren sind Wirkungsgrade über 40% Stand der Technik. In Abbildung 8 sind die maximalen Wirkungsgrade von stochiometrisch betriebenen PKW-Motoren veranschaulicht. Enthalten sind alle relevanten Motorenversuche ab 2020, die mit Methanol oder $M_{xx}F_{xx}C_{xx}$ durchgeführt wurden. Genauso wichtig wie die Bewertung des Wirkungsgrades ist die simultane Untersuchung der Schadstoffemissionen. Daher ist die verwendete Abgasmesstechnik zur jeweiligen Publikation auf der x-Achse aufgetragen. Publikationen mit Einzylindermotoren sind vollumrandet, Vollmotoren sind gestrichelt umrandet. Wurde ein FTIR ohne notwendige Methodenanpassung verwendet, ist dies mit einem Blitz gekennzeichnet, bei fehlender Angabe mit Fragezeichen.

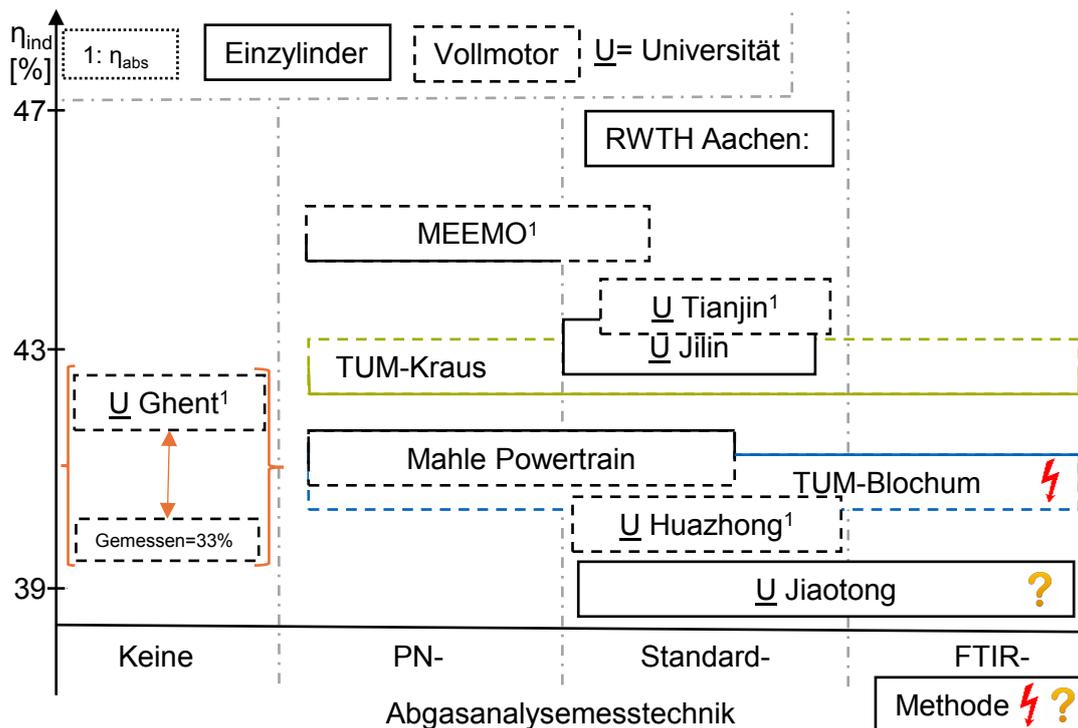


Abbildung 8: Literatur ab 2020: Wirkungsgradpotenzial und Schadstoffeinfluss für $\lambda=1$

Eine umfassende Schadstoffanalyse wurde bisher nur von Blochum [32, 43, 45] durchgeführt, wobei jedoch die Einschränkung bestand, dass das FTIR nicht mit einer kraftstoffangepassten Methode ausgestattet war. Wie die Messungen der vorliegenden Arbeit, wurden die Versuche von Blochum am Einzylinder-Forschungsmotor der TU München (TUM) durchgeführt. Als Kraftstoffe wurden neben C65F35 sowohl MeOH als auch MxxFxx Blends untersucht. C65F35 wurde ergänzend am Serien-Vierzylindermotor über das ganze Motorkennfeld sowie im dynamischen RDE/WLTC erprobt [43]. Aktuelle Benzin-Injektoren und ein Kraftstoffdruck von 35 MPa wurden mit einem Verdichtungsverhältnis von bis zu 15 verwendet. Der Einfluss des Einspritzzeitpunktes wurde am Einzylindermotor ($\epsilon \sim 11$) an einem Lastpunkt untersucht. Vergleichende Messungen wurden mit dem Referenz Einspritzzeitpunkt für Benzin durchgeführt, was die Oxygenatkraftstoffe benachteiligte.

Innerhalb Deutschlands wurden Untersuchungen mit den Kraftstoffen DMC und MeFo vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) veröffentlicht [184–186]. Im Fokus dieser Veröffentlichungen stehen Spray- und Schadstoffverhalten und nicht die motorischen Effizienz. Im internationalen Vergleich liegt der Forschungsschwerpunkt der C1-Oxygenate auf MeOH.

Im Folgenden werden alle weiteren Publikationen, die in Abbildung 8 aufgeführt sind, zusammengefasst. Der Überblick beginnt mit Versuchen an Einzylindermotoren, gefolgt von den wichtigsten Erkenntnissen aus Studien mit Vierzylindermotoren. Zum Abschluss wird der Stand der Technik unter besonderer Berücksichtigung kraftstoffspezifischer Einspritzsysteme behandelt.

Versuche mit MeOH am Einzylindermotor

Duan (U Jiaotong) führte Untersuchungen an einen Motor mit 0,5 l Hubraum durch [179]. Ein FTIR wurde für einzelne Betriebspunkte zur Bewertung unreglementierter Schadstoffe genutzt. Die verwendete Auswertemethode des FTIR wurde nicht spezifiziert. Der Motor besaß ein

Verdichtungsverhältnis von 15. Der Einspritzzeitpunkt (SOI) wurde zwischen 420°CA und 600°CA aTDCf variiert, während der Kraftstoffdruck 15 MPa betrug. Ein späterer SOI verlängerte den Brennverlauf und reduzierte die NO-Emissionen, führte aber gleichzeitig zu steigenden CO-, MeOH- und Formaldehyd-Emissionen. Vorteilhaft für die Effizienz war eine Einspritzung im Ansaugtakt, während die Einlassventile geöffnet waren. Ein SOI von 480°CA aTDCf wurde als effizienzoptimaler Einspritzstart ermittelt. In [178] wurde die Klopfestigkeit des Motors mit Direkteinspritzung im Vergleich zur Saugrohreinspritzung evaluiert. Nur mit Direkteinspritzung war der Vollastbetrieb möglich. Wurde zusätzlich zur ersten Einspritzung eine zweite, späte Kompressionseinspritzung hinzugefügt, verbesserte sich das Klopfverhalten weiter. Schadstoffemissionen wurden nicht bewertet. Im $\lambda=1,35$ Betrieb mit leicht erhöhtem Kraftstoffdruck von 18 MPa wurden Mehrfacheinspritzungen genutzt, um die Verbrennungsstabilität des Motors zu verbessern [187]. Dadurch konnte der Wirkungsgrad relativ zur Einfacheinspritzung um bis zu 7% gesteigert werden. Die effizienzoptimale Dreifacheinspritzung war mit einem Schadstoff-Trade-off verbunden.

Harrington (Mahle Powertrain) ermittelte am Motor mit $\epsilon \sim 11$ und zentralem Injektor die Performance über einen weiten Bereich des Motorkennfelds [156]. Er verwendete zur Analyse der Schadstoffemissionen PN-Messtechnik und Standardanalysatoren. Der Einfluss von Einspritzzeitpunkt und Kraftstoffdruck wurde an einem Lastpunkt untersucht. Der Kraftstoffdruck wurde von 5 bis 20 MPa und der SOI von 370 bis 460 °CA aTDCf variiert. Für diesen Motor war der optimale Einspritzzeitpunkt für Methanol vergleichbar zu dem von Benzin. Für Methanol wurde der SOI-Bereich ohne Wirkungsgradeinbußen größer. Der maximal erreichbare, indizierte Wirkungsgrad lag bei 42%, respektive 3,2% höher als für Benzin. Die Partikelgrößenverteilung verschob sich im Methanol-Betrieb hin zu kleineren Partikeln. In einer weiterführenden Veröffentlichung wurde ein Dreizylinderottomotor mit $\epsilon \sim 16$ und einer passiven und einer aktiven Vorkammerkonfiguration untersucht [188]. Stoichiometrische Lastpunkte wurden für diesen Motor als Referenzpunkte inkludiert. Der maximal erreichte Wirkungsgrad war lastpunktbedingt am Einzylinder- höher als am Dreizylindermotor.

Zhou (U Jilin) [189] erforschte den Einfluss des Verdichtungsverhältnisses ($\epsilon=13,15,17,19$) über das Kolbendesign und der Abgasrückführung (0-36%). Das MeOH wurde über eine Saugrohreinspritzung der Luft zugeführt. Je höher das Verdichtungsverhältnis war, desto stärker stiegen die Effizienz und die Toleranz gegenüber der Abgasrückführung (AGR) an. Eine höhere AGR reduzierte die NO_x-Emissionen und führte zu einem Anstieg der CO-Emissionen. Die höchste indizierte Effizienz von knapp über 44% erreichte der Motor mit $\epsilon=19$ und 30%-AGR-Rate. Weitere Versuche in [190] mit $\epsilon=15$ und variablen Ventilsteuerzeiten zeigten, dass ein Betrieb mit offener Drosselklappe und angepassten Steuerzeiten den spezifische Kraftstoffverbrauch im Niedriglastbereich um 5,6% verbessern konnte. Lai (U Jilin/GAC Automotive Research & Development Center) nutzte den Einzylindermotor mit $\epsilon=19$, um sowohl AGR als auch AGR-Luftverdünnung mit dem Ziel maximaler Effizienz zu untersuchen [191]. Beide Maßnahmen führten zu lastabhängigen relativen Effizienzsteigerungen von 10-27%, bei einem NO_x-Ausstoß von etwa 0,5 g/kWh.

Die höchsten indizierten Wirkungsgrade für Methanolmotoren wurden an der RWTH Aachen erreicht, siehe Wouters [34, 35, 192] und Burkhardt [193]. Der eingesetzte Motor basierte auf einem Tumble-Konzept und nutzte ein maximales Verdichtungsverhältnis von 20,6 bei einem Hub/Bohrungsverhältnis von 1,5. Der zentrale Injektor wurde mit einem Kraftstoffdruck von 20 MPa betrieben. Es wurde eine Einfacheinspritzung mit SOI bei 420°CA aTDCf verwendet. Je höher das Verdichtungsverhältnis und je höher das Hub/Bohrungsverhältnis waren, desto höher war der maximale darstellbare Wirkungsgrad [34, 192]. In beiden Publikationen wurde

ergänzend zu den Motorversuchen eine Verlustteilung mittels 1D-Simulation durchgeführt. Mit steigendem Verdichtungsverhältnis nahmen die Verluste durch unvollständige Verbrennung, Ladungswechsel und Wärme zu. Die Verluste aus unvollständiger Verbrennung korrelierten mit dem FID-Wert der VOC-Emissionen. Diese konnten in ihrer Komposition nicht detaillierter untersucht werden. PN-Emissionen wurden ebenfalls nicht bewertet. In [35] wurden Sprayuntersuchungen und eine 3D-Simulation zum Einzylindermotor präsentiert. Durch die verlängerte Einspritzdauer für Methanol im Vergleich zu Benzin stieg die Sprayeindringtiefe und dadurch die Wandbenetzung um den Faktor vier. In der Simulation war zu erkennen, dass ein Großteil des Methanols bis zum oberen Totpunkt wieder von der Wand verdampft.

Versuche mit MeOH am Vierzylindermotor

Sowohl Suijs (U Ghent) als auch Zhang (U Huazhong) demonstrierten hohe Wirkungsgradpotenziale an Vierzylindermotoren [194, 195]. Zhang nutzte einen Motor mit Saugrohreinspritzung und ein Verdichtungsverhältnis von 12. Er erreichte einen effektiven Wirkungsgrad von ~40% und bewertete die Schadstoffemissionen anhand der Messergebnisse verschiedener Standardanalysatoren [195]. Suijs verzichtete auf die Messung von Schadstoffemissionen mit der Begründung, dass der Betrieb ausschließlich stoichiometrisch sei und somit ein Dreiwegekatalysator bestmöglich arbeiten könnte. Suijs analysierte den Einfluss einer Niederdruck-Abgasrückführung in Kombination mit einer Abgasdrossel und variablen Einlass- und Auslassventilöffnungszeiten [194]. Basierend auf einem Central Composite Design-Versuchsplan wurde ein Regressionsmodell erstellt, um daraus den Einfluss der verschiedenen Stellparameter zu evaluieren. Die Versuche wurden an einem 1,6 l turboaufgeladenen Serienmotor durchgeführt. Der $\epsilon \sim 10$ -Motor war mit einer 15 MPa Direkteinspritzung ausgestattet. Der SOI wurde auf 420 CA aTDCf fixiert. Als Motordrehzahl wurde 1700 U/min gewählt. Ein maximaler Wirkungsgrad von 33%abs wurde am Prüfstand bei 17,5 bar p_{mi} gemessen. Das Regressionsmodell ergab einen maximal erreichbaren, effektiven Wirkungsgrad von 42%. Für einen hohen Wirkungsgrad war dabei die maximal darstellbare Last ausschlaggebend. Der effizienzoptimale Betrieb ergab sich bei einer Last von 20,5 bis 22,5 bar p_{mi} . Um diese Betriebspunkte zu erreichen, müsste die Abgasrückführung deaktiviert werden. Der AGR-bedingte Klopfvorteil wurde für Methanol innerhalb des Regressionsmodells nicht benötigt. Die ermittelten optimalen Einstellparameter wurden am Prüfstand nicht verifiziert.

Feng (U Tianjin/ GAC Automotive Research & Development Center) ersetzte in einem Vierzylindermotor die Kolben und erreichte mit einem erhöhten Verdichtungsverhältnis von 15 eine maximale Effizienz von 43,3% [196]. Wie in der Benzin-Serienbasis wurde ein Bosch HDEV6-Injektor mit 35 MPa Einspritzdruck und eine fixe Einfacheinspritzung verwendet. Haupttreiber der 5 %abs Effizienzsteigerung im Vergleich zur Serienbasis war die Reduktion der Abgaswärmeverluste. Die Verluste aus unvollständiger Verbrennung stiegen an.

Fokus Einspritzsysteme/Kraftstoffdrücke

Abbildung 9 bietet einen Überblick über die verwendeten Einspritzsysteme und Kraftstoffdrücke in den zuvor beschriebenen Motorenversuchen mit den C1-Oxygenaten. Die Publikationen, in denen Versuche mit Saugrohreinspritzung und Kraftstoffdrücken unter einem MPa durchgeführt wurden, sind durch eine graue Umrandung gekennzeichnet. Publikationen, die sich mit Hochdruckeinspritzsystemen mit zentralen, seitlichen oder nicht klassifizierten Injektorlagen beschäftigen, sind in verschiedenen Blautönen dargestellt. Im bisher beschriebenen Stand der Technik wurden ausschließlich Direktinjektoren verwendet, die nicht speziell an die Eigenschaften der verwendeten C1-Oxygenate angepasst wurden.

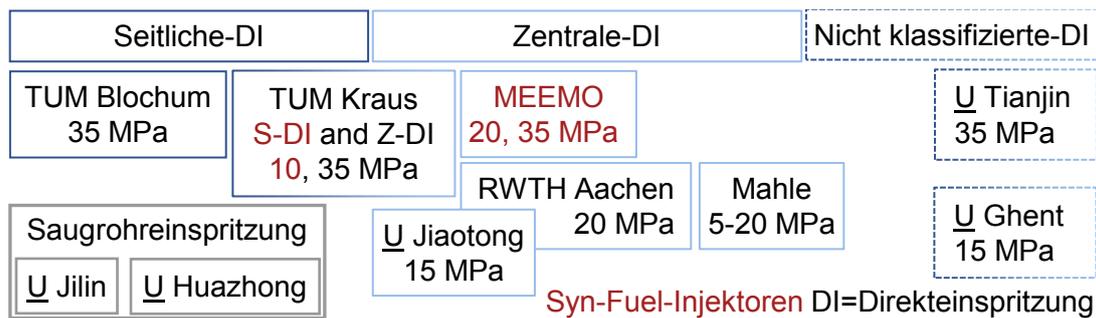


Abbildung 9: Verwendete Einspritzsysteme in Motorenversuchen mit C1-Oxygenaten

Im Forschungsprojekt „Methanol aus erneuerbarer Energie für Mobilität mit Plug-in-Hybridfahrzeugen“, kurz MEEMO, wurde ein an Methanol angepasstes Kraftstoffsystem inklusive optimiertem Injektor entwickelt [42]. Die Autoren befanden, dass das Thema Methanol-Direkteinspritzung für Ottomotoren nicht hinreichend untersucht sei. Darum wurde ein MeOH-Zentralinjektor für einen PKW-Motor mit angepasstem Durchfluss sowie optimiertem Spraytarget entwickelt. Am Einzylinder-Forschungsmotor ($\epsilon \sim 11$) des KITs wurde die Partikelbildung mit den neuen Injektoren untersucht [175]. Methanol zeigte deutliche Vorteile hinsichtlich der PN-Emissionen gegenüber Benzin. Die PN-Messwerte für Methanol waren nahe der Nachweisgrenze des SMPS-Messgeräts. Der Startzeitpunkt der Einspritzung wurde im gesamten Ansaugtakt bis hin zu frühen Kompressionseinspritzungen variiert. Der Kraftstoffdruck wurde mit 20 MPa und 35 MPa variiert. Reines Methanol zeigte dabei relativ unabhängig von beiden Parametern niedrige PN-Emissionen. Die Spray-Kolben-Interaktion bei ungünstigen Einspritzparametern führte zu keinem nennenswerten Anstieg der PN-Emissionen, da der Kraftstoff auf der heißen Kolbenoberfläche vollständig verdampfte. Bei verringertem Kraftstoffdruck sank die Spray-Kolben-Interaktion, da die Eindringtiefe des Sprays abnahm und das Kraftstoffspray sich weiter aufweitete. Die Partikelgrößenverteilung verschob sich im MeOH-Betrieb hin zu Durchmessern im einstelligen Nanometerbereich. Abgerundet wurden die Versuche am stationär betriebenen Vierzylinder-Motor bei der Mercedes-Benz AG mit einem erhöhten Verdichtungsverhältnis von 14 [183]. Ein effektiver Wirkungsgrad von 42% wurde erreicht. Formaldehyd wurde nur wenig detailliert unter warmen Bedingungen untersucht. Es wurden je nach Betriebspunkt zwischen 150 und 200 ppm emittiert. Kaltstartversuche am Serienaggregat konnten bis -20°C sicher und reproduzierbar durch die Direkteinspritzung dargestellt werden. Die Verwendung einer zündungsgekoppelten Doppeleinspritzung mit 30% Kraftstoff und 24 MPa Kraftstoffdruck zeigte sich als optimal. Mit optimiertem Methanolmotor wurde die benötigte Kraftstoffmenge für den Start mehr als gedrittelt. Zum Schadstoffausstoß unter diesen Bedingungen wurden keine Daten veröffentlicht.

2.5 Forschungsbedarf und Zielsetzung dieser Arbeit

In der Habilitation von Härtl (2021) und nachfolgend der Dissertation von Blochum (2022) wurden die Vorteile von DMC/MeFo-haltigen Kraftstoffen hinsichtlich Motorperformance und reglementierter Schadstoffemissionen dargestellt [17, 32]. In beiden Arbeiten wurde auf die Notwendigkeit hingewiesen, zukünftig auch nicht reglementierte Schadstoffe mit geeigneter Messtechnik zu untersuchen. Auch für Methanol führte Verhelst (2019) mangelnde Betrachtung von Aldehyd-Emissionen auf [16]. Zusätzlich seien die PN-Emissionen im Methanolbetrieb wenig erforscht [16]. Eine fehlende umfangreiche Schadstoffanalyse für hocheffiziente Oxygenat-Motoren kann aus Abbildung 8 auf Seite 20 abgeleitet werden.

Die zentrale Voraussetzung für eine Bewertung der nicht reglementierten Schadstoffemissionen besteht in der Beantwortung der in Kapitel 1.2 formulierten ersten Forschungsfrage. Darauf aufbauend ist das **erste Ziel** dieser Arbeit eine detaillierte Untersuchung der Abgaszusammensetzung eines mit DMC/MeFo/MeOH betriebenen Motors, insbesondere durch den Einsatz eines FTIR-Abgasanalysegeräts mit geeigneter Methode. Für eine umfassende Schadstoffanalyse werden zudem die Standardanalysatoren sowie ein modernes SPCS-System verwendet.

Verhelst et al. forderten weiter, moderne Motorentechnologie auch in Kombination mit Oxygenatkraftstoffen zu untersuchen [16]. Für Benzinmotoren haben sich in den letzten Jahren hohe Einspritzdrücke und komplexe Mehrfacheinspritzstrategien in der Serie etabliert. Dadurch wurden unter anderem die Schadstoffemissionen von leistungsdichten, direkteinspritzenden Motoren effektiv reduziert. Unabhängig von den Betriebsbedingungen wurde dieses Potenzial nicht ausreichend für die C1-Oxygenate erforscht. Einspritzdrücke in aktuellen Motorversuchen von 35 MPa sind die Ausnahme. Mehrfacheinspritzungen wurden bisher nur zur Klopfreduktion eingesetzt, ohne dabei die Schadstoffemissionen zu bewerten [178]. Im Kaltstart stellt die geringere Bauteil- und Kraftstofftemperatur neben den Schadstoffemissionen weitere Herausforderungen an den Einsatz von Oxygenatkraftstoffen. Beispielsweise muss der Kraftstoffeintrag ins Kurbelgehäuse und damit ins Motoröl nicht nur aus Effizienzgründen, sondern vor allem aus Verschleißgründen möglichst gering gehalten werden [197–199].

Der Stand der Technik hat gezeigt, dass auch die zweite Forschungsfrage valide ist. Aufgrund dessen ist das **zweite Ziel** dieser Dissertation, moderne Einspritztechnologie sowohl unter normalen Betriebsbedingungen als auch unter Kaltstartbedingungen zielführend für Oxygenate einzusetzen. Neben der Steuerungsanpassung werden der Einfluss von Injektordesign und Position untersucht.

Für Methanol wurden bereits Verdichtungsverhältnisse von ~ 20 thermodynamisch und emissionstechnisch mit Standardanalysatoren untersucht. In der Theorie und der Simulation [44, 52] ist auch für C65F35 ein derart hohes Verdichtungsverhältnis für eine maximale Effizienz zielführend, bislang aber am Prüfstand nicht erprobt.

Um diese Annahmen zu verifizieren, muss die dritte Forschungsfrage beantwortet werden. Demnach ist das **dritte Ziel** die Untersuchung von $\varepsilon \sim 20$ für C65F35 am Prüfstand. Im Rahmen der Motorversuche mit FTIR und Partikelmesstechnik wird auch ein direkter Vergleich mit Methanol durchgeführt. Darüber hinaus soll für beide Kraftstoffe das hohe Verdichtungsverhältnis mit dem vorher aufgezeigten Potenzial einer Mehrfacheinspritzung kombiniert werden. Zusätzlich soll ein effizienzoptimiertes Motorsetup für C65F35 abgeleitet und anschließend am Vollmotor realitätsnah getestet werden.

3 Methode

3.1 Einzylinder-Forschungsmotor und weitere Versuchsträger

Die Optimierungsmaßnahmen von Steuerung und Konstruktion wurden hauptsächlich an einem Einzylinder-Forschungsmotor durchgeführt.

Im Vergleich zu Serienmotoren sind Einzylinder-Forschungsmotoren besonders geeignet für grundlegende Brennverfahrensentwicklung sowie zur Bewertung neuartiger Bauteile unter stationären Betriebsbedingungen [200, 201]. Vorteile, wie ein niedrigerer Kraftstoffverbrauch und eine vereinfachte Umsetzbarkeit von komplexen Steuerungsmöglichkeiten, werden ergänzt durch eine besondere Motorlaufruhe, einer höheren Messgüte und einer besseren Reproduzierbarkeit [32]. Im Gegensatz zum Vollmotor kann der dynamische Betrieb hinsichtlich homologationsrelevanter Zyklen (RDE, WLTC) nicht abgebildet werden. Ebenso werden akustische Effekte, welche zwischen den einzelnen Zylindern eines Vollmotors auftreten, vernachlässigt. Um die letztendliche Einsatztauglichkeit im realen Umfeld bewerten zu können, ist es somit notwendig, die Ergebnisse des Einzylindermotors auf einen Vollmotor zu übertragen. Der zugehörige Vollmotor zum Einzylinder-Forschungsmotor ist der VW EA888-Vierzylinderottomotor [26, 115, 202]. Der EA888 ist ein marktrepräsentativer Motor, da er weltweit in verschiedensten Fahrzeugen der Volkswagen Group im Einsatz ist und jährlich in Stückzahlen im siebenstelligen Bereich gebaut wird [115].

Der verwendete Einzylinder-Forschungsmotor wurde über verschiedene Dissertationen und Arbeiten hinweg aufgebaut und weiterentwickelt [51, 88, 203, 204]. Blochum entwickelte drei für diese Arbeit besonders relevante Erweiterungen des Versuchsträgers [32]. Erstens wurde ein Ventiltrieb mit festen Steuerzeiten konstruiert und aufgebaut. Mit dem neuen Ventiltrieb waren Versuchsvorbereitungen für verschiedene Kolbenvarianten weniger zeitintensiv. Zweitens wurde die Kühlmittelkonditionierung erweitert, um Temperaturen bis -7°C abbilden zu können. Dadurch konnte das Emissionsverhalten unter Kaltstartbedingungen untersucht werden [36, 107]. Drittens wurde ein mobiles Kraftstoffsystem aufgebaut, welches gegen alle verwendeten Kraftstoffe resistent war. Dieser Schritt war notwendig, da die Standard-Dichtungsmaterialien nicht resistent gegen die Oxygenatkraftstoffe waren [17, 144].

In Abbildung 10 ist eine CAD-Schnittansicht des Einzylinder-Forschungsmotors gezeigt. Weiterhin sind die in dieser Arbeit durchgeführten Optimierungen hinsichtlich Motorkonstruktion und Steuerung dargestellt. Es wurden zwei verschiedene Zylinderköpfe eingesetzt, um den Einfluss der Einspritzung zu untersuchen. Für die seitliche Injektorlage, welche identisch zur Serienmotorkonfiguration ist, wurde die Einspritzstrategie auch hinsichtlich Mehrfach-Einspritzungen untersucht. Versuche wurden zum einen im betriebswarmen, zum anderen im kalten Motorzustand (Kühlwassertemperatur= -5°C) durchgeführt. Für den Serienzylinderkopf

wurde das Verdichtungsverhältnis über den Kolben erhöht sowie speziell für Oxygenatkraftstoffe adaptierte Injektoren verwendet.

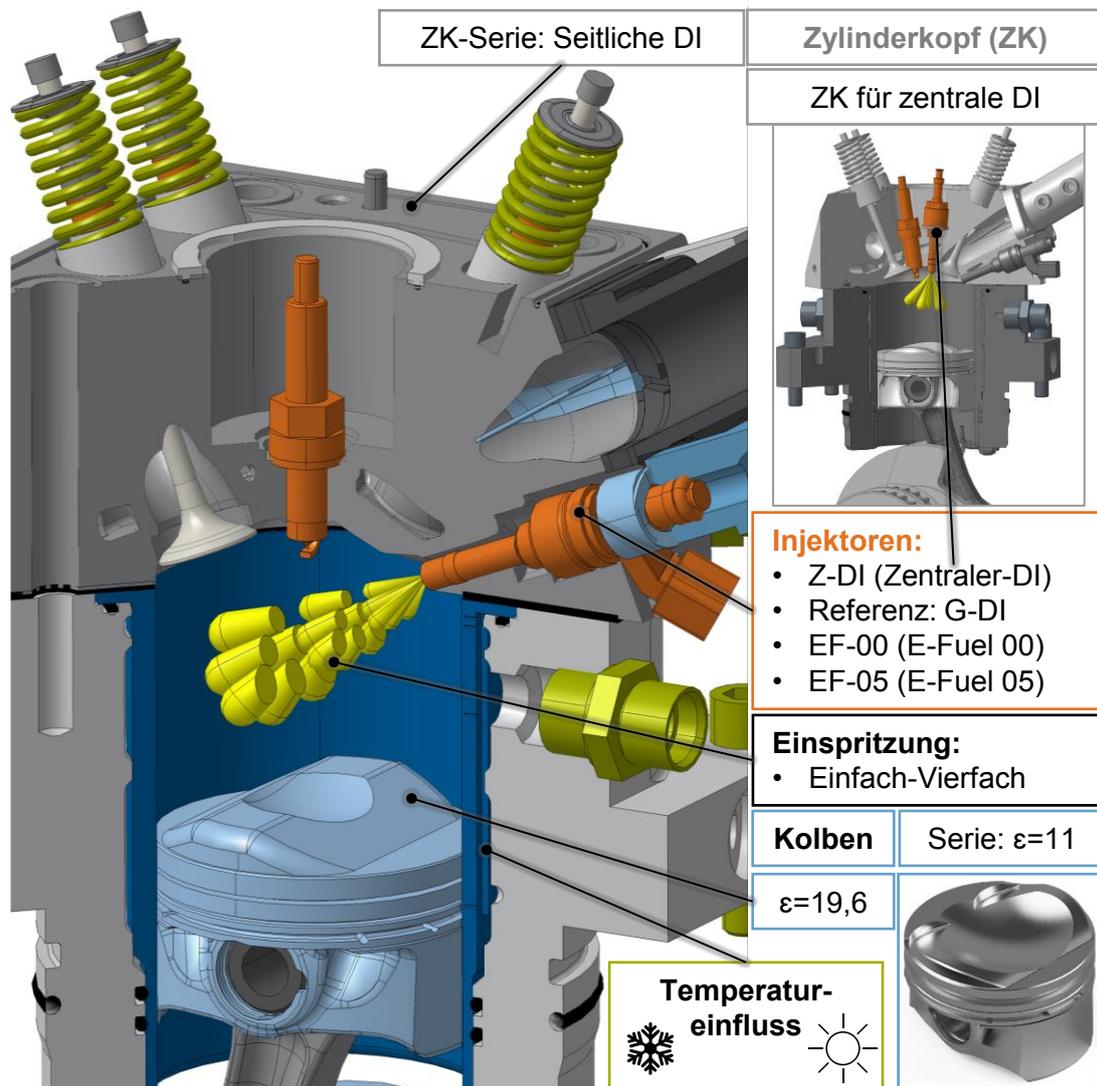


Abbildung 10: Einzylinder-Forschungsmotor und Optimierungen

Die Betriebsbedingungen des Versuchsträgers wurden über die Prüfstandperipherie eingestellt und kontrolliert. Der Prüfstands Aufbau ist in Abbildung 11 skizziert. Kühlwasser, Öl und Ansaugluft des Motors wurden konditioniert und überwacht. Die Spezifikationen der zwei verwendeten Motoröle finden sich in Tabelle B.1 im Anhang (Seite 88). Weitere Informationen hinsichtlich verschiedener Additive im primär verwendeten SAE 5W-30 Mehrbereichsöls finden sich in Tabelle B.2. Die Messdatenerfassung sowie die Prüfstandsautomatisierung und -steuerung waren über ein National Instrument-PXI in LabVIEW umgesetzt. Die Steuerung des Motors übernahm ein dSpace-Rapid Control Prototyping System, welches über MathWorks Simulink programmiert wurde.

Das Abgassystem ist in Abbildung 11 in grau im unteren rechten Teil abgebildet. Dieses beinhaltet die Messgeräte, die eine detaillierte Bewertung der Abgaszusammensetzung ermöglichen. Vor dieser Arbeit wurden bereits eine λ -Sonde, das MEXA-ONE-System und die Partikelmesstechnik zur Erforschung synthetischer Kraftstoffe genutzt [32]. Zur genaueren

Untersuchung der gasförmigen Schadstoffemissionen wurde ein FTIR der Firma IAG integriert. Damit war das benötigte Messgerät zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage vorhanden.

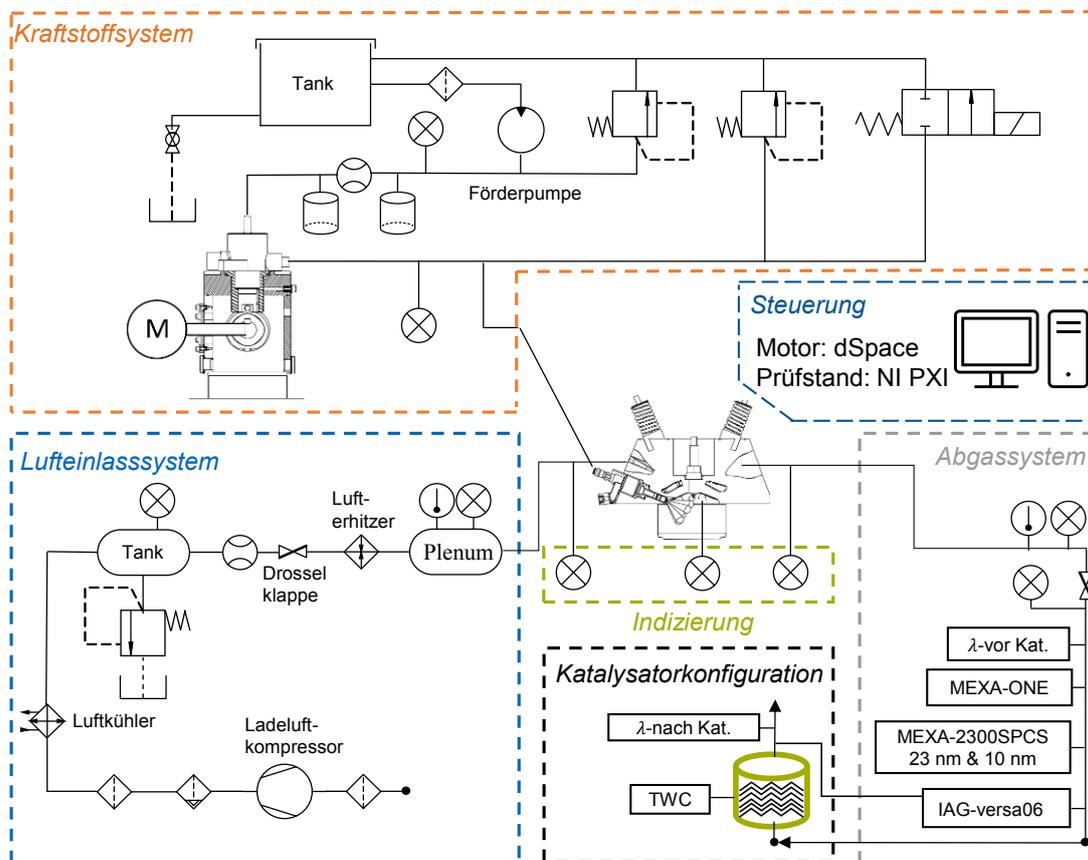


Abbildung 11: Prüfstands Aufbau

Integration eines Dreiwegekatalysators zur Bewertung von Tailpipe-Emissionen

Eine Katalysatorkonfiguration, in schwarz markiert, wurde aufgebaut, um Rückschlüsse auf sogenannte „Tailpipe-Emissionen“ eines Fahrzeugs zu ziehen. In Abbildung 12 ist das Verhalten um $\lambda=1$ für C65F35 im stationären Betrieb vor und nach dem TWC dargestellt. Die Spezifikationen des Katalysators können aus [28] entnommen werden. Über die Abgasmessung mittels FTIR vor und nach dem TWC wurde das Konvertierungsverhalten des Katalysators bewertet. Am stoichiometrischen Punkt arbeitete der Katalysator effektiv. Eine nahezu vollständige Konvertierung der gasförmigen Schadstoffemissionen, hier repräsentativ für NO, CO und CH₄ dargestellt, fand statt. Die großen Gradienten für NH₃ und NO ermöglichten die Einstellung und Überwachung des Lambdawerts auf $\lambda=1\pm 0,001$. Tagesabhängige Schwankungen der Sonden konnten somit entdeckt und durch Kalibrierung ausgeglichen werden.

Zusätzlich konnte durch die Optimierung der Lambdaregelung die Effizienz und die Roh-Emissionen mit höherer Messvalidität und -reliabilität bewertet werden. Durch eine dem Serienfahrzeug nachempfundene, zweistufige Regelung war es möglich, die eingespritzte Kraftstoffmenge präzise zu dosieren [205, 206]. Dafür wurde eine zweite zusätzliche λ -Sonde hinter dem TWC verbaut.

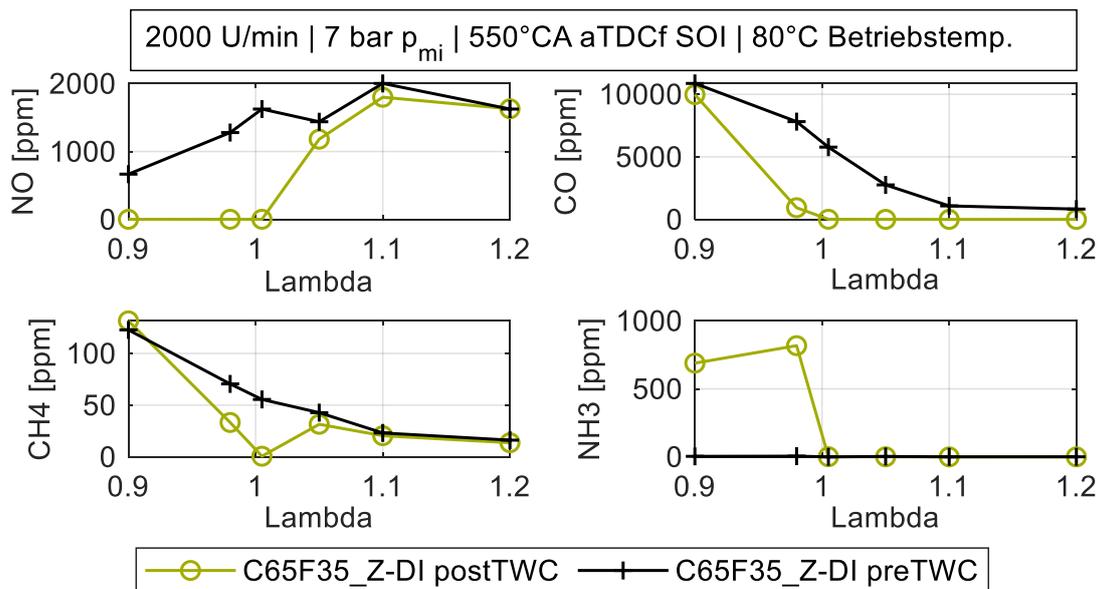


Abbildung 12: Lambda-Variation für C65F35: Schadstoffe vor/nach Dreiwegekatalysator

Um den Vorteil der zweiten Sonde darzustellen, sind in Abbildung 13 alle in den Publikationen verwendeten λ -Werte aufgetragen. Der im oberen Bereich der Abbildung angegebene, stationäre Betriebspunkt wurde über den dargestellten Zeitraum von 150 Sekunden beibehalten. Durch die motornahe Position im Abgas zeigte die vor dem Dreiwegekatalysator installierte Sonde Schwankungen im Rohsignal. Die auf der Brettschneider/Spindt-Formel [207] basierenden Auswertung des MEXA-ONE Systems analysierte ebenfalls das Rohabgas und fluktuierte deutlich. Der λ -Endress Wert wurde über den gemessenen Luft- und Kraftstoffmassenstrom berechnet. Durch die intermittierende Arbeitsweise der Kraftstoffpumpe und des Injektors war der über 50 Messpunkte gemittelte Verlauf von λ -Endress instationär. Die nach dem Dreiwegekatalysator installierte Sonde zeigte die benötigte geringe Varianz bei gleichzeitig hoher zeitlicher Auflösung. Dadurch war im stoichiometrischen Betrieb die Feinjustierung der Lambdaregelung möglich. In Abbildung 13 ist ein leichter Offset von +0,005 für die Zielgröße (Target) erkennbar. Der Offset der Zielgröße wurde durch die Analyse der Katalysator-Performance ermittelt und diente dem Ausgleich der Absolutwertschwankungen der Sonde.

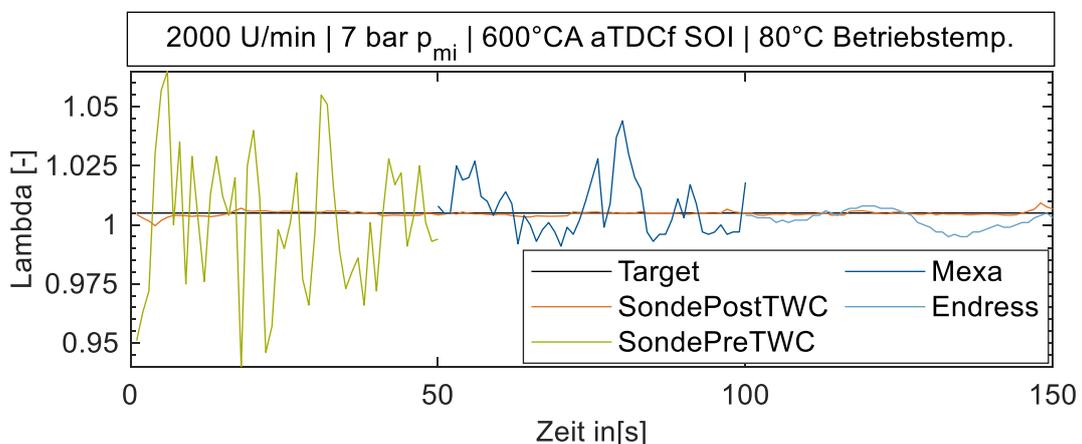


Abbildung 13: Lambda-Messwerte für C65F35 und zentraler Direkteinspritzung

Berücksichtigung eines idealisierten Abgasturboladers

Eine Aufladung war notwendig, um die maximale Leistung des Motors zu erreichen. Der Einzylindermotor war fremdaufgeladen, da der benötigte Ladedruck durch einen nicht vom Motor angetriebenen Kompressor zur Verfügung gestellt wurde. Frühere Arbeiten [32, 51] verwendeten einen Korrekturfaktor zur Anpassung motorspezifischer Kenngrößen, um die Verdichterleistung zu berücksichtigen. Der Faktor wurde aus der Arbeit eines hypothetischen, mechanischen Verdichters berechnet. In dieser Arbeit wurde die am Prüfstand vorhandene Abgasdrossel verwendet, um einen Abgasturbolader zu simulieren. Dieser Ansatz war vergleichbar zu anderen am Lehrstuhl verwendeten Prüfständen [208, 209]. Durch einen Abgasturbolader kann ein Teil der im Abgas enthaltenen Energie genutzt werden, um Ladedruck zu erzeugen. Diese effiziente Art der Aufladung wurde auch im EA888-Serienmotor verwendet. Durch den Betrieb des Turboladers steigt der Abgasgegendruck des Motors an, was sich zum einen direkt auf die Ladungswechselschleife auswirkt und zum anderen die Schadstoffemissionen des Motors beeinflusst [210]. Durch Umformung der ersten Turboladerhauptgleichung [105, 211] kann der für die Aufladung benötigte Abgasgegendruck (p_3) wie folgt berechnet werden:

$$p_3 = p_4 \left(1 - \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa_V - 1}{\kappa_V}} - 1 \right] \frac{\dot{m}_V c_{p,V} T_1}{\dot{m}_T c_{p,T} T_3 \eta_{TL}} \right)^{\frac{-\kappa_T}{\kappa_T - 1}} \quad (3.1)$$

Die verwendeten Formelzeichen sowie deren Herkunft und Werte können aus Tabelle 5 entnommen werden:

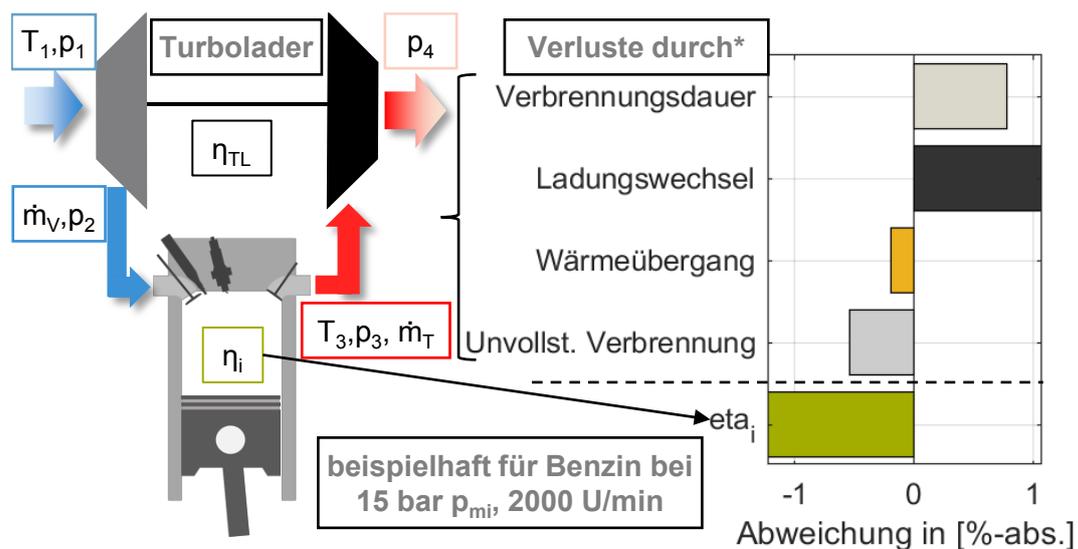
Tabelle 5: Benötigte Kenngrößen der ersten Abgasturbolader-Gleichung

| Formelbuchstabe | Bedeutung | Wert | Quelle |
|-----------------|-------------------------------------|------------|------------------------------------|
| p_1 | Druck vor Verdichter | Messdaten | p_Umgebung abs. |
| p_2 | Druck nach Verdichter | Messdaten | p_Einlass Kistler |
| p_3 | Druck vor Turbine | Messdaten | p_Abgas abs. |
| p_4 | Druck nach Turbine | Messdaten | p_Abgas_nDK abs. |
| \dot{m}_V | Frischlufmassenstrom | Messdaten | AERZEN |
| \dot{m}_T | Abgasmassenstrom | Kalkuliert | f(AERZEN, λ , L_{\min}) |
| T_1 | Temperatur Frischluft | Messdaten | T_L_Plenum |
| T_3 | Temperatur vor Turbine | Messdaten | T_Abgas_Kr. |
| $c_{p,V}$ | Spez. Wärmekapazität der Frischluft | 1007 | Vereinfacht [212] |
| $c_{p,T}$ | Spez. Wärmekapazität des Abgases | 1159 | Vereinfacht [213] |
| κ_V | Isentropenexponent der Frischluft | 1,4 | Vereinfacht [212] |
| κ_T | Isentropenexponent Abgas | 1,33 | Vereinfacht [211] |
| η_{TL} | Gesamtwirkungsgrad Turbolader | 65% | Idealisiert [211, 214] |

Die benötigten Temperaturen und Drücke wurden über die Messdatenerfassung der Motorsteuerung zur Verfügung gestellt. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten

wurden die Messwerte ohne Umrechnung auf totale Größen verwendet. Der Frischluftmassenstrom durch den Verdichter wurde direkt gemessen. Der Abgasmassenstrom, der die Turbine antreiben würde, wurde aus der Summe des Frischluftmassenstroms und des Kraftstoffmassenstroms berechnet. Letzterer wurde aus dem Luftmassenstrom und dem Verbrennungsluftverhältnis/Mindestluftbedarf berechnet. Die Stoffkenngrößen wurden vereinfacht angenommen. Temperaturabhängigkeiten dieser Kenngrößen wurden vernachlässigt. Ein idealisierter Turbolader-Wirkungsgrad von 65% wurde angenommen.

In Abbildung 14 ist das Ergebnis der Turboladersimulation im Vergleich zur fremdaufgeladenen Referenz für einen typischen Hochlastpunkt im Benzinbetrieb dargestellt. Für den benötigten Ladedruck von $\sim 1,25$ bar stellte sich ein Abgasgegendruck von $\sim 1,12$ bar ein. Dies führte zu einer Reduktion des indizierten Wirkungsgrades um 1,2%, was mit Werten aus der Literatur übereinstimmt [210]. Die geringere Effizienz ergab sich durch die Zunahme der Ladungswechselverluste und einer Verlängerung der Brenndauer. Letztere resultierte aus der klopfbedingten Spätverschiebung des Verbrennungsschwerpunktes. Im Vergleich zum fremdaufgeladenen Motor nahmen die Verluste aus unvollständiger Verbrennung ab. Wird der Abgasgegendruck und damit der Turboladerwirkungsgrad für den Motor variiert, so kann der Einfluss der Turboladersimulation auf die Motorperformance noch detaillierter abgebildet werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 28 im Anhang (Seite 86) dargestellt.



*Berechnet mit Druckverlaufsanalyse in GT-Power (limited efficiency)

Abbildung 14: Abgasturbolader-Simulation: Auswirkung auf Effizienzkenngrößen

Der Einfluss der Aufladung in den Hochlastbetriebspunkten im stöchiometrischen Betrieb ist maßgeblich vom Mindestluftbedarf und Heizwert des jeweiligen Kraftstoffs abhängig. Für Oxygenatkraftstoffe ist der Luftbedarf im Vergleich zu Benzin verringert. Dies führte zu einem geringeren Bedarf an Ladedruck für die gleiche Leistung. Der Einfluss der Abgasturboladersimulation war folglich geringer. Steigerte sich die Effizienz eines Lastpunktes, beispielsweise durch ein erhöhtes Verdichtungsverhältnis, sank der benötigte Ladedruck weiter. Diese Zusammenhänge beeinflussen die präsentierten Ergebnisse und werden daher in Abbildung 29 im Anhang detailliert dargestellt.

Einspritzkammer, Endoskopie, Einspritzverlaufsindikator und Vollmotor

Zusätzlich zum Einzylinder-Forschungsmotor wurden weitere Versuchsträger in den Publikationen verwendet. Diesen sind in Abbildung 15 abgebildet. Mittels der Einspritzkammer war es möglich, das Einspritzverhalten von Injektoren und verschiedener Kraftstoffe detaillierter zu untersuchen. Das Messsystem wurde grundlegend von Backes entwickelt und aufgebaut [88]. Die in LabVIEW programmierte Steuerung wurde für diese Arbeit weitgehend automatisiert, um schneller Messdaten bei geringerer Messtoleranz zu generieren. Für die Beleuchtung des Sprays wurden zwei Hensel VH-6000 Lampen und ein TRIA-6000 Blitzgenerator verwendet. Der Nachteil dieses Systems ist eine nicht konstante Lichtintensität. Dafür ermöglichten die hellen Lampen eine minimale Belichtungszeit der Kamera. Die inhomogene Lichtintensität wurde bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt. Als Objektiv wurde ein Nikon AF Nikkor 50 mm mit Blende f1.8 verwendet. Zur Ansteuerung wurde ein High-Speed-Controller (LaVision HSC: 1108075) verwendet.

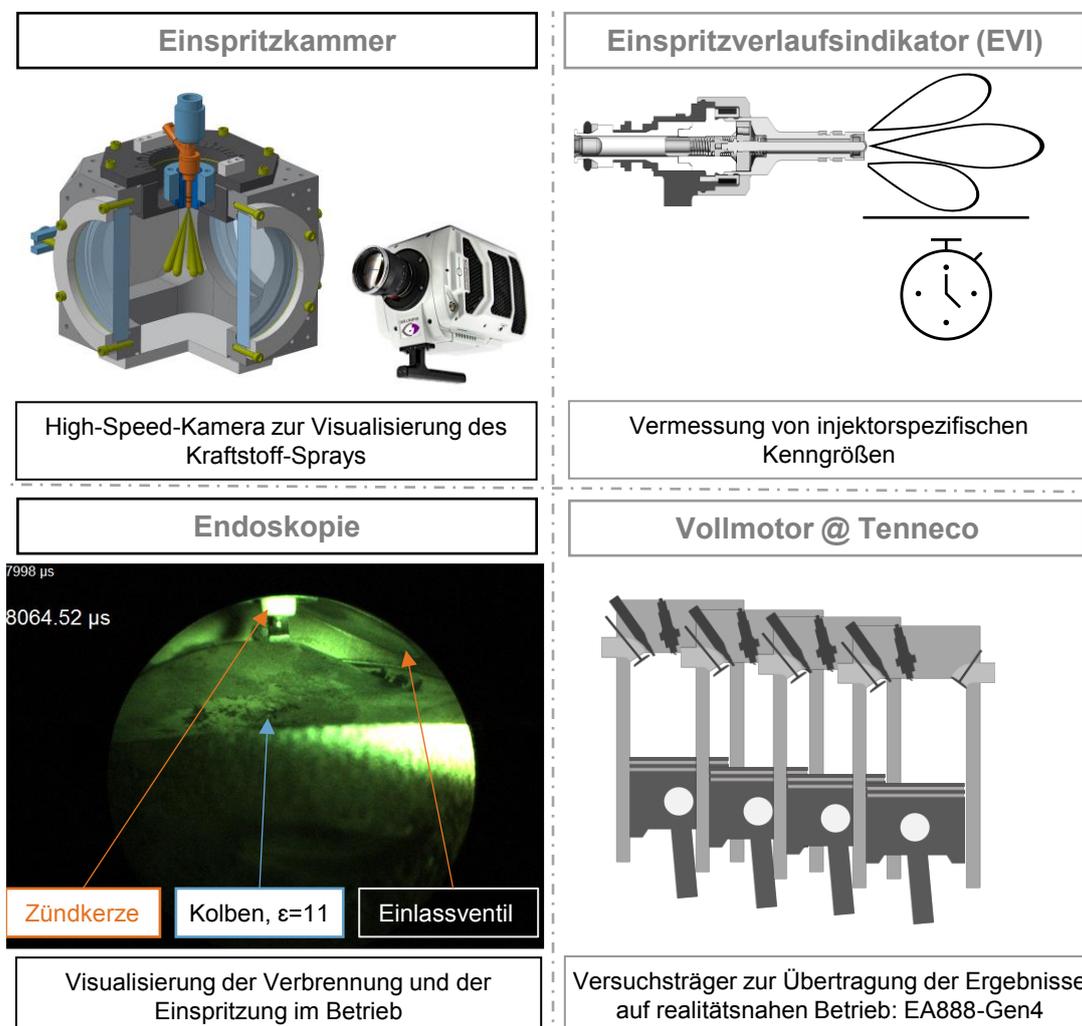


Abbildung 15: Weitere sekundäre Versuchsträger/Messaufbauten

Der endoskopische Zugang und die Lichtquelle für den Einzylinder-Forschungsmotor wurden in [88] vorgestellt. Der endoskopische Zugang wurde verwendet, um C65F35 im Kaltstartverhalten zu untersuchen, vergleichbar mit den Benzinversuchen in [36].

Der Einspritzverlaufsindikator nutzte das Prinzip des Bosch-Rohrs [215], um Einspritzraten zu messen. Gleichzeitig konnten injektorspezifische Kenngrößen ermittelt werden, wie zum Beispiel die minimal notwendige Ruhezeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einspritzungen. Am Lehrstuhl wurde das System von Schuckert aufgebaut [216]. Gellner [217] validierte das System für Diesel-Injektoren und Fellner für Otto-DI-Injektoren [120]. Das System wurde zur Charakterisierung der für C65F35 angepassten Injektoren verwendet.

Am Vollmotor (VW EA888-Gen4) wurden ausgewählte Ergebnisse der Einzylinder-Versuche auf den realitätsnahen Betrieb übertragen. Die Versuche wurden von Tenneco, vertreten durch Thamm, Retzlaff und Gadomski in Burscheid durchgeführt.

3.2 Versuchs- und Auswertungsmethodik

3.2.1 Versuchspunkte und Messdatenerfassung

Auswahl und Übersicht der Versuchspunkte:

Die ausgewählten Versuchspunkte am Einzylinder-Forschungsmotor orientierten sich am Serien-Vierzylindermotor. In Abbildung 16 ist die Motorlast in Abhängigkeit von der Motordrehzahl für die Vierzylindermotorversuche im RDE und WLTC-Zyklus mit C65F35 als Kraftstoff dargestellt. Daten, basierend auf der tatsächlichen Nutzung von PKW-Motoren im Feld, unterstreichen, dass die RDE-Daten den realen Betrieb einer PKW-Flotte repräsentieren [218]. Die Fahrzeugbasis für die RDE- und WLTC-Betriebspunkte in Abbildung 16 war ein schweres und leistungsstarkes Sport-Utility-Vehicle (SUV=Audi Q5). Demzufolge lagen die Hochlastpunkte an der Leistungsgrenze des Motors.

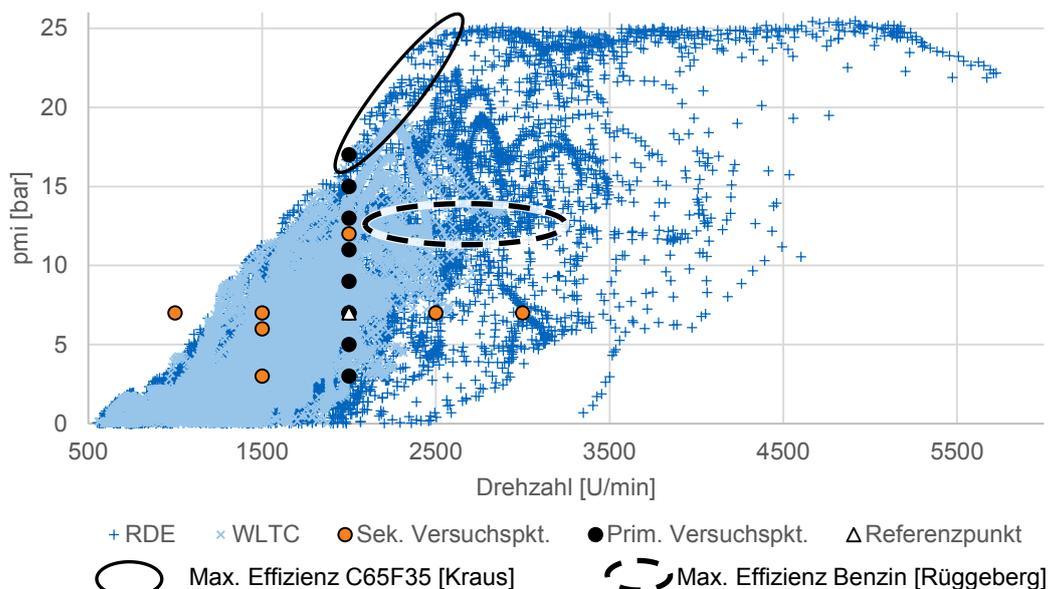


Abbildung 16: Versuchspunkte im Vergleich zum RDE/WLTC für $\lambda=1$, C65F35 [26, 61]

Die in Orange dargestellten, sekundären Versuchspunkte waren Betriebspunkte, die nicht in allen Messkampagnen enthalten waren. Die primär verwendeten Versuchspunkte am Einzylinder-Forschungsmotor, dargestellt in schwarz, bildeten die Motorlast bei einer Drehzahl von

2000 U/min ab. Einer der primären Versuchspunkte des Einzylindermotors befand sich im Bereich der höchsten Effizienz des Vierzylindermotors im Betrieb mit C65F35 [61]. Zwei der primären Versuchspunkte lagen nahe der maximalen Effizienz des mit Benzin betriebenen Serienmotors [26]. Die unterschiedliche Lage der Bereiche maximaler Effizienz für Benzin und C65F35 war im Wesentlichen auf die erhöhte Klopfestigkeit, den verringerten Luftbedarf und die höhere Kraftstoffkühlung des Oxygenatkraftstoffs zurückzuführen.

Messpläne zur Untersuchung der Einspritzung in der optischen Kammer bzw. am Einspritzverlaufsindikator wurden basierend auf den Motormessdaten des Einzylinders erstellt. Eine ausführliche Beschreibung des Vorgehens findet sich in der zugehörigen Publikation.

Messdatenerfassung des Einzylindermotors:

Die Messdaten wurden mittels LabVIEW (2021) über ein NI-PXI-Messsystem aufgezeichnet. Alle nicht kurbelwinkelaufgelösten Messgrößen und berechneten Kennwerte wurden einmal pro Sekunde in ein Logfile geschrieben. Die Versuche wurden größtenteils mit Snapshots im TDMS-Format ausgewertet. Ein Snapshot bestand aus den gemittelten Messdaten von 200 aufeinanderfolgenden Arbeitsspielen. Enthalten waren sowohl die 0,1°CA aufgelösten Indizierkanäle, wie zum Beispiel der Brennraumdruckverlauf, als auch die mit reduzierter Frequenz von 5 Hz abgetasteten Emissionswerte der Abgasmessgeräte. Die indizierten Messgrößen der 200 Arbeitsspiele wurden zusätzlich gesondert als Rohdaten abgespeichert.

Leistungskenngrößen wie der indizierte Mitteldruck (p_{mi}), der indizierte Wirkungsgrad und die Mitteldruckstandardabweichung wurden zeitsynchron zur Aufnahme mitberechnet (5 Hz).

Der indizierte Mitteldruck, welcher als hubvolumennormierte (V_H) Leistungskenngröße verwendet wird, berechnet sich über das Umlaufintegral des hinterlegten Volumenänderungsverlaufs über den gemessenen Zylinderdruck (p):

$$p_{mi} = \frac{\oint p dV}{V_H} \quad (3.2)$$

Über den indizierten Mitteldruck wird mit Drehzahl (n) und Hubvolumen die indizierte Leistung berechnet:

$$P_i = \frac{p_{mi} * V_H * n}{2} \quad (3.3)$$

Aufgrund der präzisen λ -Ermittlung wurde die Luftmasse (m_{Luft} , ermittelt durch AERZEN) als Basis zur Berechnung des indizierten Wirkungsgrades (η_i) verwendet. Die Berechnung der Kraftstoffmasse war der direkten Massenflussmessung überlegen, da das zugrundeliegende Messprinzip eines Coriolis-Massenflussmessgeräts durch den diskontinuierlichen Kraftstofffluss des Einzylindermotors beeinträchtigt war. Der diskontinuierliche Massenfluss wurde durch die Hochdruckpumpe und den Injektor verursacht. Für die Oxygenat-Kraftstoffe konnte durch die Installation von Druckausgleichsbehältern die Messgüte der direkten Kraftstoffflussmessung auf das Niveau der luftuhrbasierten Rechnung erhöht werden. Dieses System war allerdings nicht für alle Versuche vorhanden und zeigte Schwächen in Bezug auf die Haltbarkeit. Die direkte Messung des Kraftstoffflusses wurde zur Überwachung und zum Abgleich verwendet. Der indizierte Wirkungsgrad wurde unter Zunahme des stöchiometrischen Mindestluftbedarfs (L_{min}) und des unteren Heizwerts (H_U) berechnet:

$$\eta_i = \frac{P_i * \lambda * L_{min}}{H_U * \dot{m}_{Luft}} \quad (3.4)$$

Der Kennwert, der die Verbrennungsstabilität repräsentiert, ist die Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks (COV_{pmi}). Der COV_{pmi} wurde analog zu [32] berechnet, und auch die Stabilitätsgrenze von 3% wurde übernommen.

Die Messwerte der Abgasmesstechnik wurden über ein AK-Protokoll an die Messdatenerfassung mit einer Frequenz von 5 Hz gesendet. Für das FTIR wurden zusätzlich einmal pro Messtag das Hintergrundspektrum und alle Rohdaten während eines Snapshots über die Software des Herstellers abgespeichert. Somit war es möglich, die Messdaten im Postprocessing mit einer beliebigen, gegebenenfalls angepassten Methode erneut auszuwerten.

Optische Messdatenerfassung:

Sowohl die optischen Messdaten der Kammer als auch der Endoskop-Messungen wurden mittels LaVision Davis (Version 8.4.0) aufgezeichnet. Das Programm wurde zur Überwachung während der Messungen und zum einmaligen Konvertieren der optischen Messdaten verwendet.

3.2.2 Messdatenaufbereitung

Jegliche Datenaufbereitung wurde mittels Matlab (R2020b) durchgeführt.

Einzylindermotor

Während dieser Arbeit wurde eine automatisierte Messdatenverarbeitung mittels Matlab erstellt. Die entwickelte Applikation las den Messplan ein, konvertierte die zugehörigen TDMS-Snapshots und fasste diese zu mat-Tabellen zusammen. Beispielsweise wurden die Snapshots eines Lastschnittes in einer Tabelle zusammengefasst. Dabei konnten auch FTIR-Rohdaten neu ausgewertet werden. Die mittels Hersteller-Software (MG2000) erstellten prn-Daten wurden in Matlab eingelesen und über die Zeitdauer von 200 Arbeitsspielen gemittelt. Neben den Mittelwerten war die Standardabweichung enthalten. Die Werte zur jeweiligen Emission wurden der Auswerte-Tabelle angehängt. Anschließend wurden die Tabellen mittels Matlab-GUI visualisiert.

Indizierte Messdaten und Logfiles wurden ebenfalls mittels eigener Matlab-Applikation ins entsprechende Format konvertiert und dargestellt. Die zeitliche Mittelung während der Messdatenerfassung stellte die einzige Datenaufbereitung dar. Da die Konvertierung und Visualisierung ohne Datenverarbeitung stattfand, wird nicht weiter auf diese zwei Schritte eingegangen.

Optische Messdaten

Die Aufbereitung der Bilder erfolgte ebenfalls automatisiert mit Matlab: Die Endoskopaufnahmen wurden in ein Graustufenbild im tiff-Format konvertiert und in ihrer Helligkeit rekaliibriert. Anschließend wurde die Colormap-Funktion „jet“ auf das Bild angewendet.

Die Spraymessungen der Einspritzkammer wurden für jede Einspritzung gemittelt, in der Helligkeit kalibriert und zugeschnitten. Im zweiten Schritt wurde einmal die Injektorspitze für den jeweiligen Messaufbau markiert. Anschließend wurde über einen fixen Graustufenwert ein Schwarz-Weiß-Bild erstellt. Dadurch konnten über einen Algorithmus die Außenkonturen des Sprays detektiert werden und sowohl die Spraywinkel als auch die Eindringtiefe ermittelt werden.

Alle Endoskopmessungen und alle Kammermessungen wurden jeweils mit identischen Kalibrierfaktoren und Grenzwerten ausgewertet.

3.2.3 1-D Simulation: Druckverlaufsanalyse

Der indizierte Wirkungsgrad und die Ladungswechselperluste konnten direkt über die verfügbaren Messdaten ermittelt werden. Verluste aus unvollständiger Verbrennung und Abgas konnten in erster Näherung über den Abgasmassenstrom, aus der Analyse der CO- und THC-Bestandteile im Abgas sowie der Abgastemperatur bestimmt werden [51]. Für eine thermodynamischen Analyse der Verbrennung und der sich daraus ergebenden Verluste ist eine Druckverlaufsanalyse hilfreich [50]. Mit dieser ist es möglich, die Qualität des Brennverlaufs zu quantifizieren.

Die Druckverlaufsanalysen für diese Arbeit wurden mittels GT-SUITE v2022 der Firma Gamma Technologies durchgeführt. Mittels Druckverlaufsanalyse konnte der Brennverlauf unter Berücksichtigung der Wandwärmeverluste (Modell: WoschniGT, nach [219]) zusätzlich zu dem am Prüfstand ermittelten Heizverlauf bestimmt werden. Die wichtigsten Eingangsdaten bildeten die drei kurbelwinkelaufgelösten Drücke (Einlass-, Brennraum- und Abgasdruck), weshalb im Englischen von einer „Three-Pressure Analysis“ (TPA) gesprochen wird. Das Modell basierte im Wesentlichen auf dem GT-Beispiel „SI_TPA_steady“ und ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Kraftstoffeinspritzung wurde angepasst. Es wurden Emissionen (Mexa), Temperaturen und Massenströme zur Feinabstimmung berücksichtigt. Da GT-SUITE eine objektbasierte Programmiersprache verwendet, soll die Abbildung als Überblick genügen. Das verwendete Modell erfüllte alle zehn durch den Hersteller empfohlenen Konsistenzüberprüfungen [220]. Das Modell wurde an die jeweilige Motorkonfiguration und den jeweiligen Kraftstoff angepasst. Unter anderem wurde beim Einlesen der durch den FID-Analysator ermittelte THC-Wert verdoppelt, um den geringeren Response-Faktor für die verwendeten Oxygenat-Kraftstoffe zu berücksichtigen. Für Methanol und Benzin wurden die Kennwerte der Softwaredatenbank verwendet. Für C65F35 wurde ein vereinfachtes Stoffmodell mit den Daten aus Tabelle 3 angenommen.

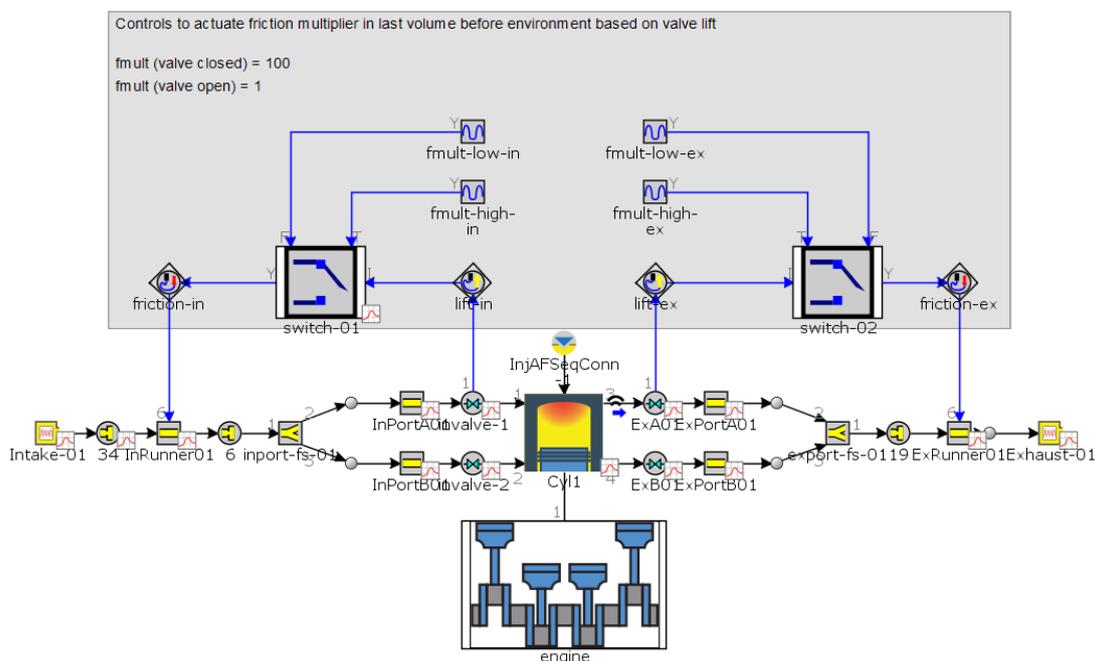


Abbildung 17: Simulations-Modell zur Druckverlaufsanalyse in GT-Suite

4 Ergebnisse

4.1 Anpassung der FTIR-Methode an DMC/MeFo-haltige Kraftstoffe

Folgende Ergebnisse wurden publiziert in:

Kraus, C., Jakubec, P., Girhe, S., Fellner, F. et al., "Adaptation and Engine Validation of an FTIR Exhaust Gas Analysis Method for C1-Based Potential GHG-Neutral Synthetic Fuels/Gasoline-Blends Containing Dimethyl Carbonate and Methyl Formate," SAE Technical Paper 2022-02-0569, 2022, doi.org/10.4271/2022-01-0569 [221]

Ein FTIR mit adäquater Methode ermöglicht eine detaillierte Untersuchung der gasförmigen Abgaszusammensetzung. Eine Methode wurde für Kraftstoffe benötigt, die sowohl DMC als auch MeFo enthalten können. Bisherige Untersuchungen von DMC/MeFo-haltigen Kraftstoffen mittels FTIR verwendeten teilweise eine nicht angepasste [28] oder eine nicht validierte Methode [43]. Somit waren Schlussfolgerungen in Bezug auf Komponenten wie CH₄, MeOH und CH₂O in ihrer Güte eingeschränkt aussagekräftig. Dies war kritisch zu bewerten, da beide erwähnten Vorversuche einen Trend hin zu erhöhten Rohemissionen eben jener Komponenten aufwiesen [28, 43]. Um die erste Forschungsfrage zu beantworten, wurde in der ersten Publikation beschrieben, wie ein FTIR-Abgasanalyse-Systeme an den Einsatz von C1-Oxygenaten angepasst und für diese validiert werden kann.

Im Wesentlichen wurden vier Schritte in einem iterativen Prozess durchgeführt, um die vom Hersteller entwickelte Benzin-Methode (IAG-Gasoline R4) an den Kraftstoff anzupassen.

- Aufnahme neuer Kalibrierkurven für DMC und MeFo in die Stoffbibliothek
- Auswahl eines Wellenlängenbereichs zur Evaluierung des DMC- und MeFo-Bestandteils
- Minimierung der auftretenden Quereinflüsse der einzelnen Bestandteile zueinander
- Bewertung der angepassten Methode und gegebenenfalls erneutes Durchlaufen aller genannten Schritte

Nach der Anpassung wurde die TUM-Methode (TUM_DMC_21_7_13) anhand von sechs Teilprüfungen detailliert untersucht, um die Qualität zu verifizieren:

- Überprüfung der Methode mittels Kalibriergasen (NO, CO, CO₂, NH₃, N₂O, MeFo, C65F35)
- Überprüfung der Robustheit von CO₂, NO, DMC und MeFo gegen Wasserquerinterferenz
- Analyse des nicht verwendeten Spektrums zur Bewertung, ob alle relevanten, im Licht enthaltenen Informationen verwertet wurden (<0,2 Absorption Units)
- Direkter Vergleich mit Standardanalysatoren (CLD/NDIR) für CO, CO₂ und NO_x
- Vergleich der TUM-Methode mit der Standardmethode des Herstellers im Benzinbetrieb
- Prüfung der Plausibilität anhand der Abgasemissionen von zwölf verschiedenen Kraftstoffen mit unterschiedlichen DMC/MeFo-Anteilen

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen, wurden abschließend vier getrennte Messungen mit C65F35 durchgeführt und evaluiert.

In Motorversuchen mit Kraftstoffen, die DMC/MeFo enthalten, konnten durch den Einsatz eines FTIR mit validierter Methode grundlegende Trends bezüglich der CH₄-, MeOH- und CH₂O-Emissionen aufgezeigt werden. Zusätzlich wurde die reaktionskinetische Grundlage der Entstehungsmechanismen für diese drei Schadstoffe untersucht. Im Vergleich zum Reaktionsmechanismus von Benzin zeigte der von DMC eine erhöhte CH₄- und CH₂O-Bildung bei nahezu gleichbleibender MeOH-Produktion. In Bezug auf CH₄ und CH₂O wurde der Trend durch die Motorversuche bestätigt. Mit der Beimischung von DMC zu Benzin nahm die Konzentration beider Abgasbestandteile nahezu linear zu. Auch die Methanolemissionen stiegen mit der Beimischung von DMC an, was durch den Reaktionsmechanismus nicht erklärt werden konnte. Eine Überprüfung des Mechanismus wurde als notwendig erachtet. Für MeFo wurde ausgehend von den Simulationsergebnissen ein Anstieg von CH₂O erwartet. Dieser Trend bestätigte sich jedoch am Motor nicht, da die verbesserten Gemischbildungseigenschaften durch die Beimischung des volatilen MeFo den Reaktionsmechanismus überkompensierten.

Individueller Beitrag an der Publikation:

Die vorliegende Publikation wurde auf der Grundlage einer klar definierten Wissenslücke im Stand der Technik und der daraus resultierenden Aufgabenstellung im Rahmen des NAMOSYN-Projekts konzipiert. Der Hauptautor leitete die Idee zur Publikation ab, konzipierte diese, baute das Messgerät am Prüfstand auf und integrierte es in die vorhandene Messdatenerfassung. Er plante und führte alle Messungen am FTIR durch. Anschließend entwickelte er die Auswerterroutine zur Datenaufbereitung und Visualisierung und wertete damit die Ergebnisse aus. Die Versuchsergebnisse wurden vom Autor interpretiert und tiefgreifend diskutiert. Das Manuskript der Publikation wurde vom Autor verfasst und vom Autor um die Anmerkungen der Co-Autoren erweitert. Die Kritik der Gutachter wurde, wo erforderlich, ebenfalls vom Autor in die finale Fassung eingearbeitet. Er stellte die Ergebnisse in einer Online-Präsentation auf der SAE WCX-Konferenz vor [222].

Der Mitautor Jakubec war hauptsächlich für die Anpassung der Benzinmethode und für die Beschreibung des FTIR verantwortlich. Er unterstützte zudem bei den Versuchen der Kalibrierungsmessungen. Der Mitautor Girhe war federführend bei der Erforschung der Reaktionskinetik von DMC und MeFo.

Zusätzliches Ergebnis: FTIR-Methodenvergleich für Methanolversuche

Die TUM-Methode wurde in dieser Arbeit verwendet, um MeOH und MxxFxx-Blends zu bewerten. Ob ein Einsatz der TUM-Methode für diese Kraftstoffe gerechtfertigt ist, wird nachfolgend mit der später verfügbaren, kommerziellen MeOH-Methode des Herstellers (IAG Methanol R4) überprüft. Eine Analyse mit der TUM-Methode ist bis 3000 ppm MeOH zulässig, da dies das Maximum der Kalibration ist. Für den Methodenvergleich werden Versuche mit zentralem Injektor im betriebswarmen Zustand verwendet. In Abbildung 18 sind die wichtigsten Abgaskomponenten dargestellt. Die Auswertung durch beide Methoden ergibt nahezu identische Emissionswerte. Nur für CO₂ tritt ein Versatz um ~0,3 vol% auf. Werden die CO₂-Werte auf trockenes Abgas referenziert, können diese mit den Messungen des MEXA-NDIR-Analysators verglichen werden. Der Mittelwert der TUM-Methode liegt 0,5 vol% unter dem NDIR-Wert und damit näher an diesem als der um weitere 0,4 vol% niedrigere Wert der IAG-Methode.

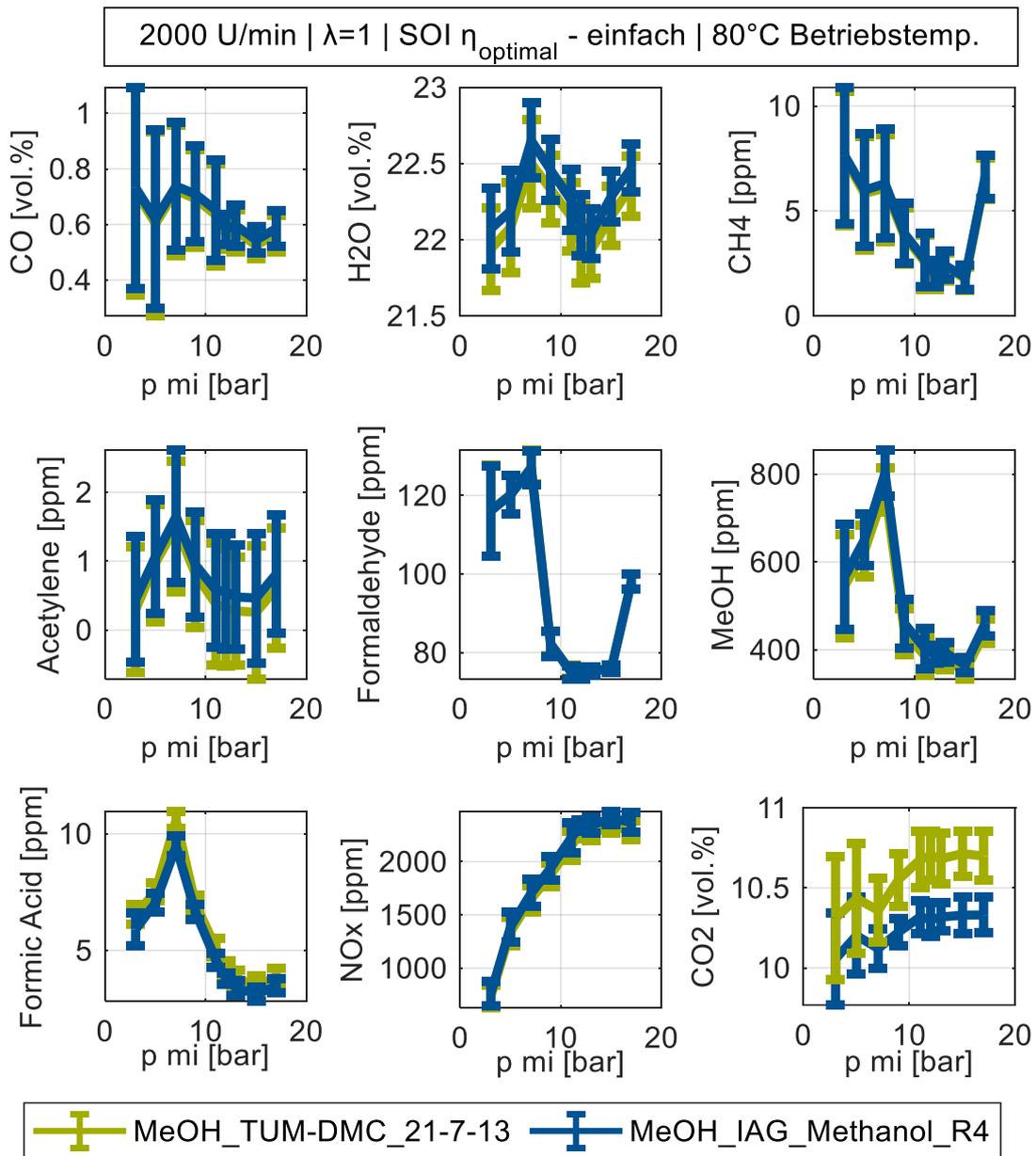


Abbildung 18: Methodenvergleich im Methanolbetrieb: TUM gegen IAG_Methanol_R4

Der Methodenvergleich ergibt für die weiteren, nicht abgebildeten Abgaskomponenten:

- Ethane und HCN für beide Methoden betragsmäßig <2 ppm
- DMC und MeFo (TUM-Methode) betragsmäßig <4 ppm. In der IAG-Methode sind diese nicht enthalten.
- Ethanol: Mittelwert der TUM-Methode +18 ppm, alle Einzelwerte sind positiv. Die Anwendung der IAG-Methode ergibt im Mittel fehlerhafte -35 ppm.
- NH_3 und N_2O für beide Methoden betragsmäßig <5 ppm. Nur die Auswertung mit der IAG-Methode ergibt fehlerhafte, negative Einzelwerte.
- Ethylene: Mittelwert der TUM-Methode=1 ppm, der IAG-Methode 15 ppm

Der Einsatz der TUM-Methode für MeOH und MxxFxx-Kraftstoffe war aufgrund der vergleichbaren Absolutwerte zulässig.

4.2 Einspritzstrategie für verschiedene Kraftstoffzusammensetzungen

Folgende Ergebnisse wurden publiziert in:

Kraus, C., Fitz, P., Fellner, F., Härtl, M. et al., "Exhaust Gas Analysis of Various Potential GHG-Neutral Synthetic Fuels and Gasoline/Alkylate-Blends Including Variable Injection Timings," SAE Technical Paper 2022-01-1085, doi.org/10.4271/2022-01-1085 [132]

Die bestehende Literatur [45, 131, 186, 223–225] konnte durch das FTIR mit validierter Methode hinsichtlich der Verbesserung der Motorperformance durch die Mischung von DMC und MeFo zu C65F35 oder als Blendkomponente erweitert werden. Ein quantifizierbarer und direkter Vergleich war durch die Verwendung eines einzigen Versuchsträgers für die Vielzahl an Blends (G90C10,...G50C50, A05F95, A90F10, G85F15, M85F15, M65F35) und Reinkraftstoffen (MeFo, DMC, MeOH, G100, A100) möglich. Anhand der motorischen Versuche wurde gezeigt, dass eine Beimischung von MeFo zu einem Kraftstoff wie Benzin, Alkylatbenzin oder Methanol vielversprechender als eine Zugabe von DMC ist. Neben der vorteilhaften Reaktionskinetik wurde durch die höhere Verdampfungswilligkeit die Gemischaufbereitung verbessert. Weitere Vorteile des Einsatzes von MeFo waren eine verbesserte Zylinderkühlung, eine rußärmere Verbrennung und eine erhöhte Klopfestigkeit.

Neben einem möglichst hohen MeFo-Anteil im Kraftstoff war die Einspritzstrategie ein entscheidender Hebel zur Verbesserung der Gemischaufbereitung und der Ladungsbewegung. Mit steigendem Sauerstoffanteil im Kraftstoff sank der Energieinhalt. Zum Erreichen der gleichen Leistung wurde mehr Kraftstoffmasse benötigt. Dadurch erhöhte sich der Einfluss des Einspritzzeitpunktes auf das Motorverhalten. Gleichzeitig war der Einspritzzeitpunkt durch den im Kraftstoff enthaltenen Sauerstoff und dessen rußfreie Verbrennung weniger eingeschränkt, was besonders für reine Oxygenatkraftstoffe den Bereich möglicher Einspritzungen erweiterte. Dieser Trend wurde bereits in [43, 45] beobachtet und in dieser Publikation für weitere Blends und Abgasbestandteile bestätigt. Der Einfluss des Einspritzzeitpunktes von Benzin und Benzin-Blends mit Beimischraten <10 vol% war vergleichbar. Der Referenzeinspritzzeitpunkt von Benzin lag bei 430°CA aTDCf. Der gleiche Einspritzzeitpunkt ergab im Einsatz von reinen Oxygenatkraftstoffen Wirkungsgradeinbußen, eine verschlechterte Verbrennungsstabilität und erhöhte, gasförmige Schadstoffemissionen. Spätere und frühere Einspritzzeitpunkte verbesserten die Ladungsbewegung und Gemischaufbereitung.

Gasförmige Schadstoffe wurden, unabhängig vom Kraftstoff, im betriebswarmen Zustand durch einen Dreiwegekatalysator aus dem Abgas entfernt. Für C65F35 wurden Konvertierungsraten über 90% bei minimaler Bildung (<35 ppm) von NH₃ an alle primären Versuchspunkte demonstriert. Gelingt es der Motorsteuerung, ein enges Lambdafenster einzuhalten, war der Motorbetrieb mit minimalen gasförmigen Schadstoffemissionen möglich.

Die Einspritzstrategie wurde im betriebswarmen Zustand optimiert mit dem Ziel minimale PN-Emissionen bei maximalem Wirkungsgrad zu erreichen. Die PN-Emissionen von C65F35 waren unabhängig vom Einspritzzeitpunkt bis 9 bar p_{mi} auf einem Niveau nahe der Nachweisgrenze. Eine spätere Einspritzung während des Ansaugtaktes (SOI=460°CA aTDCf) führte zu einer schnelleren Verbrennung, wodurch sich der Wirkungsgrad um 2%rel steigern ließ. Bei höheren Lasten, insbesondere dem Maximallastpunkt bei 17 bar p_{mi} , ging der Wirkungsgradvorteil der späteren Einspritzung im Vergleich zum Referenzeinspritzbeginn verloren. Zudem stiegen die PN-Emissionen für beide Einspritzzeitpunkte auf über 10⁵ #/cm³. Dies entsprach den

Emissionswerten von Benzin bei 11 bar p_{mi} . Die erhöhten PN-Emissionen wurden hauptsächlich auf eine intensive Spray-Laufbuchsen-Interaktion zurückgeführt. Eine weitere Frühverschiebung des Einspritzzeitpunktes auf 410°CA aTDCf führte zu einer Spray-Kolben-Interaktion. Dadurch reduzierten sich die PN-Emissionen. Allerdings stiegen die CH_4 -Emissionen während sich die Brenngeschwindigkeit verringerte. Der Zielkonflikt zwischen Bauteilinteraktion, Brenngeschwindigkeit und Schadstoffemissionen konnte mittels Mehrfacheinspritzung gelöst werden. Die PN-Emissionen gingen durch die verwendete Mehrfacheinspritzung am Maximallastpunkt auf $2 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ zurück. Drei kurze Einspritzungen während des Ansaugtaktes ermöglichten eine gute Homogenisierung des Kraftstoffes und dadurch geringere CH_4 - und CH_2O -Emissionen. Zur Reduktion der durch die Verdichtung ansteigenden Brennraumtemperaturen wurden 24% des Kraftstoffes erst während der Kompression eingespritzt. Dadurch nahmen die NO_x -Emissionen bei gleichbleibender Effizienz ab.

Im Lastschnitt der M85F15-Messung mit einem SOI von 430°CA aTDCf waren im Lastbereich < 11 bar p_{mi} die PN10-Emissionen auf einem Niveau von $\sim 10^5 \text{ \#/cm}^3$. Um dieses Phänomen genauer zu analysieren, wurden M100, M85F15 und M65F35 mit dem ladungswechselvorteilhaften Einspritzzeitpunkt von SOI=460°CA aTDCf untersucht. Durch den verbesserten Einspritzzeitpunkt verringerten sich die PN10-Emissionen im niedrigen Lastbereich. Für 3 bar p_{mi} war das PN10-Niveau von M85F15 im Vergleich zu C65F35 oder Benzin um etwa das Zehnfache erhöht. Für reines Methanol stiegen die PN10-Emissionen weiter an, wohingegen die Beimischung von 35 vol% MeFo das Problem beseitigte. Die Reproduzierbarkeit des Phänomens konnte für M100 nicht erbracht werden. Die primäre Ursache für die erhöhten PN10-Emissionen wird in der Diskussion ab Seite 50 genauer erläutert.

Individueller Beitrag an der Publikation:

Aufbauend auf der bisher veröffentlichten Literatur leitete der Hauptautor die Idee zur vorliegenden Publikation ab und konzipierte diese. Er leitete den Aufbau der Katalysatorkonfiguration und der Optimierung der Lambda-Regelung an. Er plante und führte alle Messungen am Motorprüfstand durch. Die Versuchsergebnisse wurden vom Autor ausgewertet, interpretiert und tiefgreifend diskutiert. Das Manuskript der Publikation wurde vom Autor verfasst und vom Autor um die Anmerkungen der Co-Autoren erweitert. Die Kritik der Gutachter wurde, wo erforderlich, ebenfalls vom Autor in die finale Fassung eingearbeitet. Er stellte die Ergebnisse auf der SAE Powertrains, Fuels and Lubricants-Konferenz in Krakau vor [226].

Zusätzliches Ergebnis: Zertifiziert nachhaltiges, normkonformes Benzin

Zum Zeitpunkt der Publikation war kein nachhaltiges synthetisches Benzin verfügbar. Deshalb wurde ein Alkylat-Benzin (A100) verwendet, das ähnliche Eigenschaften eines Fischer-Tropsch Benzins aufweist. Das Alkylat-Benzin hat im Vergleich zu herkömmlichem Benzin eine verringerte Klopfintensität, wies im Motorbetrieb aber ähnlich geringe PN-Emissionen wie die Oxygenatkraftstoffe auf. In Abbildung 19 ist ein zertifiziert nachhaltiges Benzin (P100) im Vergleich zu den beiden anderen Benzinkraftstoffen in Abhängigkeit der Motorlast gezeigt. P100 ist ähnlich klopfest wie G100, die Schwerpunktlage (EU50) ist für alle Lastpunkte identisch. Der Betrieb am Maximallastpunkt ist anders als für A100 möglich. Im Vergleich zu G100 ist für P100 weder ein Vorteil hinsichtlich der PN-Emissionen noch der NO_x - oder THC-Emissionen ersichtlich. Wie im Stand der Technik beschrieben, ist eine signifikante Verbesserung der Motorperformance und der Schadstoffemissionen mit einem normkonformen Kraftstoff nur schwer umsetzbar.

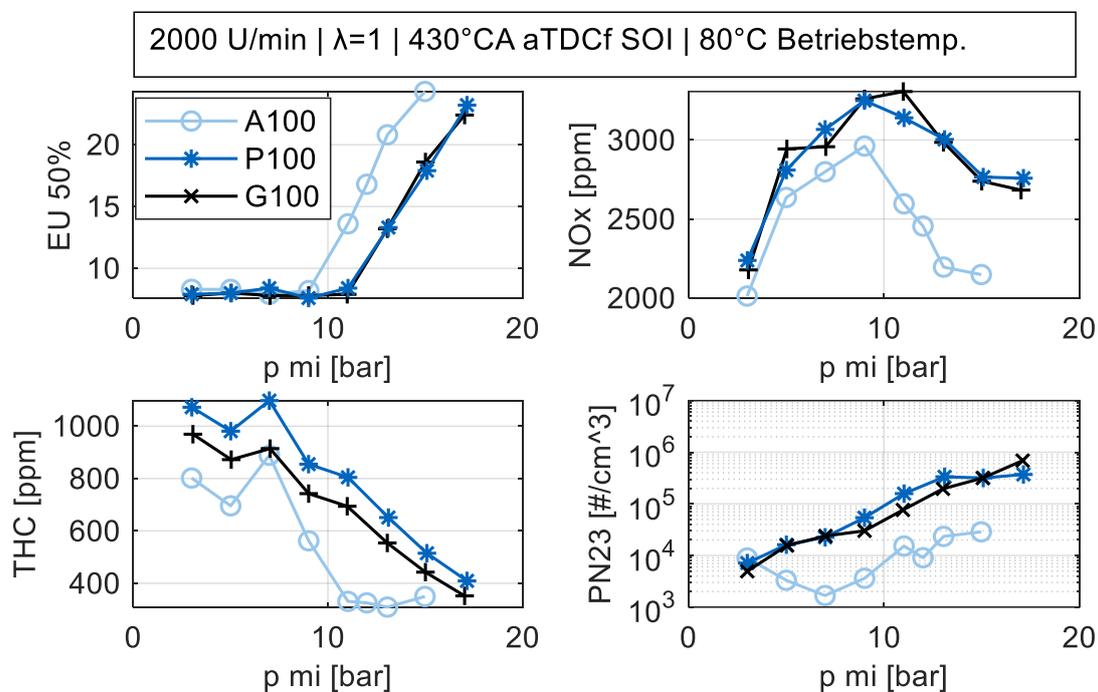


Abbildung 19: Synthetisches Benzin-Erweiterung um P100

4.3 Optimierung der Einspritzung unter Kaltstart-Bedingungen

Folgende Ergebnisse wurden publiziert in:

Kraus, C., Fellner, F., Miyamoto, A., Sauerland, H. et al., "Cold Start Performance of Sustainable Oxygenated Spark Ignition Fuels: JSAE 20239089," doi.org/10.4271/2023-32-0166. [227]

Ein Großteil der Schadstoffemissionen moderner PKW wird direkt nach dem Motorstart ausgestoßen. Die niedrigeren Temperaturen von Kraftstoff und Injektor führen unter anderem zu einer verschlechterten Gemischaufbereitung, die zu steigenden THC-, CO- und PN-Emissionen führt. Zudem liegt die Temperatur der Abgasnachbehandlung unter der Light-off-Temperatur, dadurch werden gasförmige Schadstoffemissionen nicht effektiv gereinigt. Eine weitere technische Herausforderung, die in Kaltstartsituationen verstärkt auftritt, ist der Kraftstoffeintrag in das Motoröl. Dieser verringert die Tragfähigkeit des Öls und erhöht so den Verschleiß. Kraftstoffeintrag und Emissionsverhalten verschlechtern sich unter kalten Umgebungsbedingungen weiter, da sowohl Motor als auch Abgasnachbehandlung länger brauchen, bis ihre optimale Betriebstemperatur erreicht ist. Innermotorisch wird dieser Trend durch einen Einsatz von Oxygenatkraftstoffen noch verstärkt. Verglichen mit Benzin wird mehr Kraftstoff mit höherer Kühlwirkung für die gleiche Motorlast in den Brennraum eingebracht. Eine geeignete Einspritzstrategie zur Vermeidung von Öleintrag und minimalen Schadstoffemissionen (gasförmig und fest) ist ein primäres Ziel der Motorapplikation. Die Wirkungsgradmaximierung ist bis zum Erreichen der Betriebstemperatur ein sekundäres Ziel. Das Aufheizen des Abgases auf Kosten der innermotorischen Effizienz wurde in dieser Untersuchung nicht betrachtet.

In den optischen Versuchen in der Spraykammer zeigte der Temperatureinfluss auf das Kraftstoffspray für C65F35 die gleichen Tendenzen wie für MeOH und Benzin. Reduziertes Flash-Boiling und eine geringere Verdampfungsrate führten zu einer größeren Sprayeindringtiefe. Dies korreliert bei unverändertem Einspritzzeitpunkt direkt mit einer größeren Spray-Bauteil-Interaktion und einem potenziell gesteigerten Kraftstoffeintrag in das Motoröl.

Dieser Trend bestätigte sich am Einzylinder-Forschungsmotor für alle Kraftstoffe. Einspritzungen im Ansaugtakt führten zu einem Blow-By-Kraftstoffverlust von zirka 10%. Durch den Kraftstoffeintrag ins Kurbelgehäuse verfärbte sich das Öl und wurde in seiner Konsistenz deutlich viskoser, ähnlich auch beschrieben in [228]. Besonders kritisch war der Betrieb mit C65F35 und MeOH. Die Einspritzstrategie wurde optimiert, um den Kraftstoff-Blow-By zu reduzieren. Mit einer späten Kompressionseinspritzung (SOI650°CA aTDCf) wurde dieser für MeOH und C65F35 minimiert. Der Wirkungsgrad wurde durch die 200°CA Spätverschiebung des Einspritzzeitpunktes um 10%rel verbessert. Hauptsächliche Ursache des Wirkungsgradzuwachses war eine Verringerung des Kraftstoff-Blow-Bys. Wie im betriebswarmen Motorzustand, wurde aufgrund der späten Kompressionseinspritzung die intensive Spray-Laufbuchsen-Interaktion durch eine Spray-Kolben-Interaktion ersetzt. Zudem fand die Einspritzung bei einem erhöhten Zylindergegendruck statt und wurde so in der Sprayeindringtiefe reduziert. Durch die geringere Spray-Wand-Interaktion sanken die PN-Emissionen. Mit Benzin war eine derart späte Einspritzung nicht möglich, da diese zu einer instabilen Verbrennung und einer etwa 1000-fach erhöhten PN-Anzahl führte. In Abbildung 20 sind die beschriebenen Effekte veranschaulicht. Die Partikelquelle Öl-Reverse-Blow-By war lastabhängig und wurde nur wenig von der Einspritzstrategie beeinflusst.

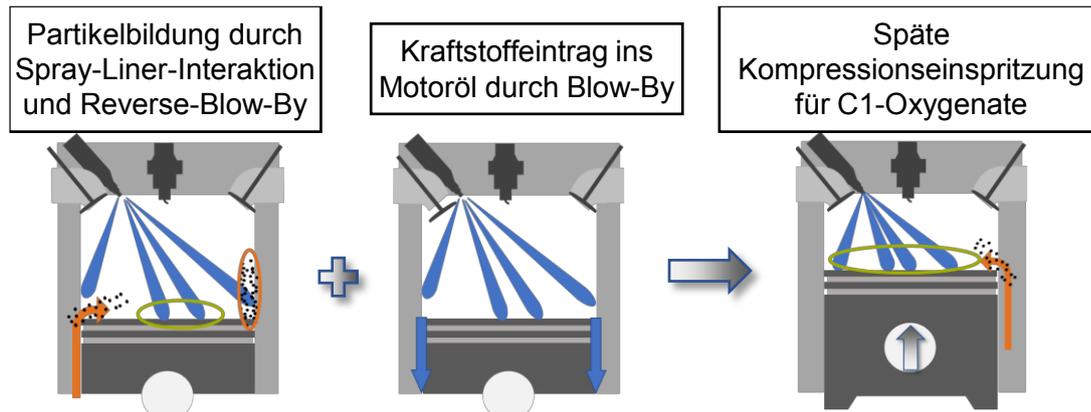


Abbildung 20: Veranschaulichung der Kaltstartproblematik mit Lösungsansatz

Methanol wies während des Kaltstarts, unabhängig vom Einspritzzeitpunkt, erhöhte PN-, NO₂-, CH₂O-, MeOH- und Ameisensäure-Emissionen bei geringerem CH₄-Ausstoß im Vergleich zu C65F35 auf. Dies war zum einen durch die Kraftstoffzusammensetzung und Reaktionskinetik und zum anderen auf das Nichtvorhandensein eines leicht siedenden Bestandteils zurückzuführen. Deshalb wurde C65F35 für weitere detailliertere Untersuchungen ausgewählt.

Die Verwendung von Mehrfacheinspritzungen zeigte die gleichen Tendenzen wie die Einfach-einspritzung auf. Je mehr Kraftstoff während der Kompression spät eingespritzt wurde, desto geringer waren die DMC-, PN- und NO-Emissionen bei gleichzeitig geringerem Kraftstoffeintrag ins Öl. Zudem stiegen die CO-, CH₄- und CH₂O-Emissionen an, welche auf eine unvollständige Verbrennung zurückzuführen waren.

Wurde die Motorlast gesteigert, sanken die PN-Emissionen. Dies war während der ersten Betriebssekunden durch einen geringeren Reverse-Blow-By begründet. Die Verringerung des Reverse-Blow-Bys war wiederum auf den höheren Zylinderdruck im geschleppten Betrieb vor dem Feuern zurückzuführen. Die Versuchsdurchführung verfolgte das Ziel einheitliche, minimale Temperaturen einzuhalten und konnte nicht direkt auf den Kaltstart eines konventionellen Fahrzeugs übertragen werden. Ein weiterer Grund für die niedrigeren PN-Emissionen für höhere Motorlasten war der schnellere Anstieg der Brennraumtemperatur. Nach 60 s waren die PN₂₃-Emissionen bei einer Last von 15 bar p_{mi} auf $3 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ gesunken.

Die abschließende optische Untersuchung mittels Endoskops verfehlte das Ziel, die PN-Quellen von C65F35 im Kaltstart zu identifizieren. Allerdings zeigten die endoskopischen Aufnahmen qualitativ einen ähnlichen Farbtrend wie die Untersuchungen am volloptischen Motor im betriebswarmen Zustand. Auch unter kalten Bedingungen blieb die Verbrennungstemperatur von C65F35 niedriger als die von Benzin.

Individueller Beitrag an der Publikation:

Aufbauend auf der bisher veröffentlichten Literatur leitete der Autor die Idee zur vorliegenden Publikation ab und konzipierte diese. Er plante und führte alle Messungen am Motorprüfstand durch. Er leitete die Erstellung einer automatisierten Aufnahme und Evaluierung der Spraymessungen an und begleitete diese. Die Versuchsergebnisse wurden vom Autor ausgewertet, interpretiert und tiefgreifend diskutiert. Das Manuskript der Publikation wurde vom Autor verfasst und vom Autor um die Anmerkungen der Co-Autoren erweitert. Die Kritik der Gutachter wurde, wo erforderlich, ebenfalls vom Autor in die finale Fassung eingearbeitet. Er stellte die Ergebnisse auf der JSAE Powertrains, Energy and Lubricants-Konferenz in Kyoto vor [229].

4.4 Anpassung des Injektors und des Kraftstoffdrucks

Folgende Ergebnisse wurden publiziert in:

Kraus, C., Fellner, F., Miyamoto, A., Sauerland, H. et al., "Injector Design and Fuel Pressure Variation for Oxygenated Spark Ignition Fuels," SAE Technical Paper Series 2023, doi.org/10.4271/2023-01-0306, SAE Technical Paper 2023-01-0306 [148]

Neben der Einspritzstrategie ist vor allem der Kraftstoffdruck entscheidend, um die Schadstoffgrenzwerte einzuhalten. Ein Kraftstoffdruck von 35 MPa hat sich für aktuelle, direkteinspritzende Benzin-Motoren etabliert. Aufgrund der potenziell rußfreien Verbrennung von Oxygenat-Kraftstoffen ist ein derartig hoher Kraftstoffdruck zur PN-Reduktion nicht notwendig. Eine Reduktion des Kraftstoffdrucks hat eine Verringerung der eingespritzten Menge bei gleicher Einspritzdauer zur Folge. Aufgrund des reduzierten Heizwerts der Oxygenatkraftstoffe ist eine Hardwareanpassung des Injektors notwendig, um die benötigte Kraftstoffmenge mit verringertem Einspritzdruck in den Brennraum einzubringen. Die Publikation behandelt die Untersuchung zweier angepasster Prototypen im Vergleich zum bisherigen Referenzinjektor in Einspritzkammer, Einspritzverlaufsindikator (EVI) und Einzylindermotor.

Der Kraftstoffeinfluss auf die Spraywinkel und die Eindringtiefe des Referenzinjektors wurde im betriebswarmen Zustand für einen Kraftstoffdruck von 35 MPa evaluiert. Die Einstellparameter der Kammerversuche, wie Bestromungsdauer und Gegendruck, wurden aus den Motormessdaten des jeweiligen Kraftstoffs und Injektors abgeleitet. Im Vergleich zu Benzin führte die erhöhte Einspritzdauer bei gleichzeitig verringertem Gegendruck zu einer längeren Sprayeindringtiefe bei C65F35 und M85F15. M85F15 wies den längsten Einspritzstrahl für die Kammerversuche auf, die mit den Parametern des niedrigsten Lastpunktes durchgeführt wurden. Nur für M85F15 konnte an diesem Punkt die genaue Länge nicht evaluiert werden, da diese die maximal darstellbare Eindringtiefe in der Spraykammer überschritt. In Bezug auf die zuvor präsentierten Ergebnisse der PN-Emissionen unterstrich dies, dass für M85F15 eine größere Kraftstoff-Liner-Interaktion auftrat als für C65F35. Flash-Boiling trat für keine motorrelevante Last auf. Beide angepassten Injektoren besaßen größere Düsenlochdurchmesser und hatten dadurch einen um zirka 1,8-fach erhöhten Durchfluss im Vergleich zum Referenzinjektor. Bei gleichem Einspritzdruck stieg die Sprayeindringtiefe für die angepassten Injektoren an, was eine erhöhte Kraftstoff-Liner-Interaktion erwarten ließ. Eine Reduktion des Kraftstoffdrucks führte zu einer Reduktion der gemessenen Eindringtiefe. Einer der Prototyp-Injektoren besaß im Vergleich zu den anderen beiden Injektoren ein um 5° weiteres Spraytarget. Da kein Flash-Boiling auftrat, war eine Aufweitung des Spraytargets nicht notwendig. Eine Interaktion der äußeren Spraykeulen mit der Laufbuchse wurde aus geometrischen Gründen wahrscheinlicher.

Am EVI verdeutlichte sich der Zusammenhang zwischen angepassten Injektoren, Kraftstoffdruck und Einspritzdauer. Zusätzlich konnten die Designanpassungen quantifiziert bewertet werden. Neben der Benzinreferenz mit 35 MPa wurden die nachfolgenden Versuche ausschließlich mit C65F35 durchgeführt. Das Designziel des erhöhten Flusses konnte für beide Injektoren erreicht werden. Die am Motor verwendete minimale Einspritzdauer war länger als der ballistische Bereich der Injektoren. Mehrfacheinspritzungen wären somit für die angepassten Magnet-Injektoren technisch möglich gewesen. Die eingespritzte Kraftstoffmenge der angepassten Injektoren mit 10 MPa Kraftstoffdruck war bei gleicher Bestromungsdauer nahezu identisch zur Kraftstoffmenge des Referenzinjektors mit 35 MPa.

Am Motor bestätigten sich die Ergebnisse der Vorversuche. Durch die höhere Eindringtiefe war der Betrieb mit 35 MPa Kraftstoffdruck, den Syn-Fuel-Injektoren und Einfacheinspritzung ab 11 bar p_{mi} aus emissionstechnischen Gründen nicht sinnvoll. Allerdings erlaubte der ausschließlich durchflussangepasste Injektor eine Kraftstoffdruckreduktion von 35 auf 10 MPa. Mit dem Referenzinjektor und 10 MPa Kraftstoffdruck war der 17 bar p_{mi} Lastpunkt bei 2000 U/min auf Grund von Verbrennungsinstabilitäten nicht darstellbar. Zudem stiegen die PN-Emissionen ab 9 bar p_{mi} um das Zehnfache an. Der Syn-Fuel-Injektor mit identischem Spraytarget konnte die komplette Last bei 2000 U/min mit reduziertem Kraftstoffdruck darstellen und zeigte im Vergleich zum Referenzinjektor mit 35 MPa keine Nachteile bezüglich der PN-Emissionen. Auch gasförmige Schadstoffe, die auf unvollständige Verbrennung hinweisen, wie CO, CH₂O, DMC und MeOH, waren nicht erhöht.

Unabhängig vom Einspritzzeitpunkt trat am Referenzpunkt durch die Reduktion des Kraftstoffdrucks ein Nachteil hinsichtlich indizierter Effizienz auf. Der reduzierte Kraftstoffdruck wirkte sich negativ auf die Ladungsbewegung aus. Auch Kompressionseinspritzungen waren nur mit deutlich erhöhten CH₄- und CH₂O-Emissionen darstellbar. Dies war auf die verkürzte Gemischaufbereitungszeit in Kombination mit schlechterem Sprayaufbruch zurückzuführen. Eine erneute Erhöhung des Kraftstoffdrucks auf 35 MPa verringerte bei einem Einspritzzeitpunkt von 650°CA aTDCf die CH₄- und CH₂O-Emissionen im Vergleich zu 10 MPa um etwa 30%. Es ergaben sich Absolutwerte von 350 ppm CH₄ und 200 ppm CH₂O für die späte Kompressionseinspritzung mit 35 MPa. Zum Vergleich wurden je nur etwa 100 ppm CH₄ und CH₂O mit einer Einspritzung während der Ansaugung und einem Kraftstoffdruck von 10 MPa emittiert.

Individueller Beitrag an der Publikation:

Aufbauend auf der bisher veröffentlichten Literatur leitete der Autor die Idee zur vorliegenden Publikation ab und konzipierte diese. Er plante und führte alle Messungen am Motorprüfstand durch. Er leitete die Erstellung einer automatisierten Aufnahme und Evaluierung der Spraymessungen an und begleitete diese. Die Versuchsergebnisse wurden vom Autor ausgewertet, interpretiert und ausführlich diskutiert. Das Manuskript der Publikation wurde vom Autor verfasst und vom Autor um die Anmerkungen der Co-Autoren erweitert. Die Kritik der Gutachter wurde, wo erforderlich, ebenfalls vom Autor in die finale Fassung eingearbeitet.

Die Messungen am Einspritzverlaufsindikator wurden vom Co-Autor Fellner durchgeführt und ausgewertet.

Zusätzliches Ergebnis: Veränderung der Gemischaufbereitung – Strahlgeführte Einspritzung

Wie bei seitlicher Injektorlage tritt mit zentralem Injektor ein deutlicher PN- und NO_x-Vorteil für C65F35 im Vergleich zu Benzin auf. In Abbildung 21 ist die relative Änderung beider Schadstoffe in Abhängigkeit zur Motorlast dargestellt.

In Abbildung 22 werden die CH₄-, CH₂O-, DMC- und PN23-Emissionen von seitlicher und zentraler Einspritzung mit festem Einspritzzeitpunkt miteinander verglichen. Durch die veränderte Injektorlage wird die luftgeführte Gemischaufbereitung durch ein strahlgeführtes Verfahren ersetzt. Als Kraftstoff wurde C65F35 verwendet. Im Anhang ab Seite 87 finden sich die Ergebnisse mit MeOH.

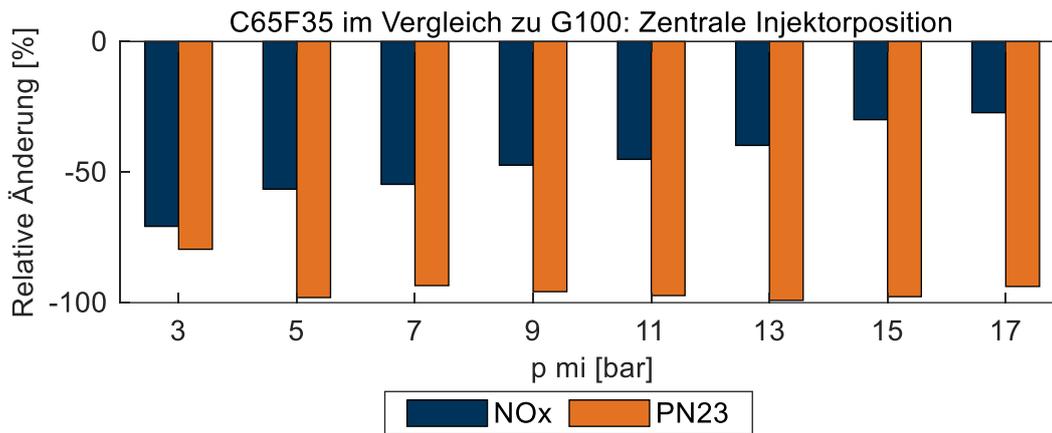


Abbildung 21: Zentrale Direkteinspritzung: Schadstoffvergleich von C65F35 zu Benzin

Im Hochlastbereich zeigt die zentrale Einspritzung deutliche Vorteile, obwohl der Basismotor nicht dafür konzipiert wurde. Die Benetzung der Laufbuchse durch das Spray ist reduziert, was sich in geringeren PN- und CH₄-Emissionen äußert. Die maximalen PN23-Emissionen bei 17 bar p_{mi} sind mit 3x10⁴ #/cm³ auf niedrigem Niveau. Der Zielkonflikt zwischen Effizienz und PN-Emissionen tritt für das strahlgeführte Verfahren nicht auf.

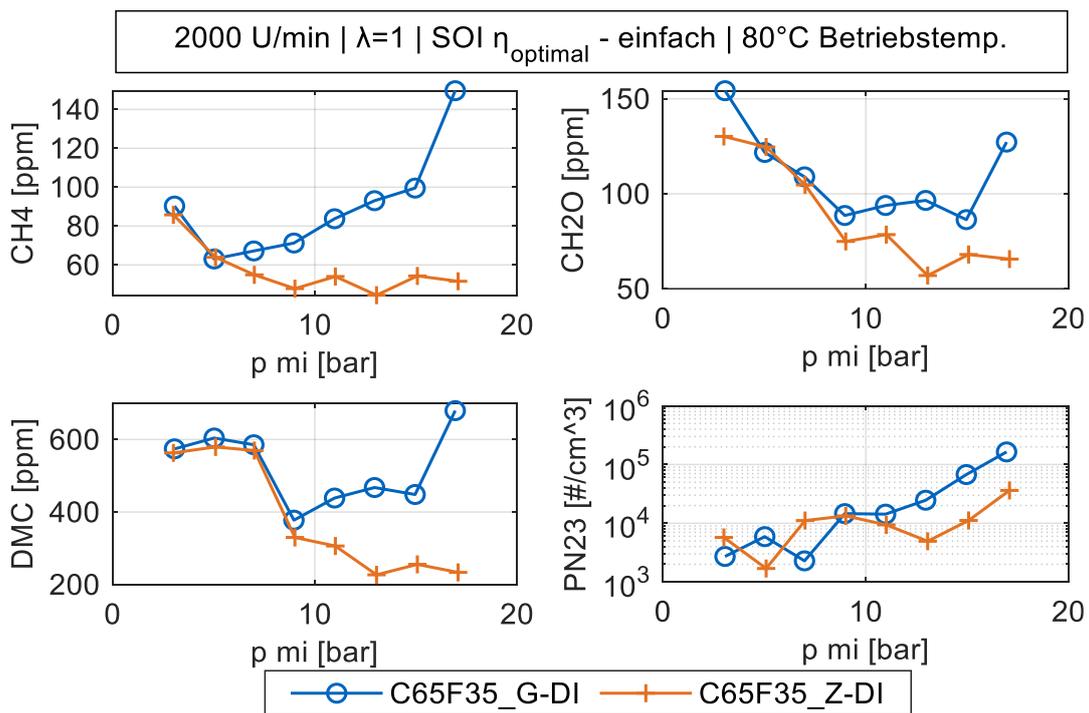


Abbildung 22: C65F35: Vorteile der zentralen im Vergleich zur seitlichen Direkteinspritzung

Bei den MeOH-Versuchen mit weiterentwickeltem Injektor (Z-DI2), die in Abbildung 31 auf Seite 87 dokumentiert sind, wurde für die seitliche Injektorlage ein variabler Einspritzzeitpunkt gewählt. Stiegen die PN-Emissionen, so wurde die Einspritzung früher durchgeführt und damit die einhergehende, verringerte Verbrennungsgeschwindigkeit in Kauf genommen. Trotzdem zeigte die zentrale Einspritzung ein geringeres Emissionsverhalten bezüglich der PN-Emissionen. Insbesondere wurde der PN10-Anstieg im Niedriglastbereich vermieden. Im Hochlastbereich wurde weniger unverbranntes MeOH ausgestoßen. Der geringe Einfluss der Injektorlage auf den Wirkungsgrad kann durch das Messsystem nicht quantifiziert werden.

4.5 Wirkungsgradsteigerung durch Kolbenanpassung

Folgende Ergebnisse wurden publiziert in:

Kraus, C., Thamm, F., Retzlaff, M., Gadowski, B. et al., "Highly Efficient and Clean Combustion Engine for Synthetic Fuels," SAE Technical Paper 2023-01-0223, doi.org/10.4271/2023-01-0223 [61]

Bereits publizierten Untersuchungen [32, 34, 43] demonstrieren, dass C65F35 und MeOH Kraftstoffe sind, die hohe indizierte Wirkungsgrade ($\eta_i > 41\%$) durch hohe Verdichtungsverhältnisse ermöglichen. Über eine Anpassung der Kolbengeometrie kann das Verdichtungsverhältnis für ein bestehendes Motorkonzept erhöht werden.

Bereits in simulativen Voruntersuchungen [44] wurde ein Verdichtungsverhältnis von 19 für ein C65F35-Downsizing-Motorkonzept gewählt, das zu einem effektivem Wirkungsgrad von 42,6% führte. Am Prüfstand wurde mit C65F35 ein indizierter Wirkungsgrad von 41,9% bei einem Verdichtungsverhältnis von 19,6 am 15 bar p_{mi} Lastpunkt erreicht. Lasten ab 11 bar p_{mi} waren nur durch die Verwendung einer Mehrfacheinspritzung hinsichtlich Emissionsverhalten und Verbrennungsstabilität sinnvoll darstellbar. Der geringere Wirkungsgradzuwachs im Vergleich zur Simulation ist auf den durch die Brennraumgeometrie verursachten ungünstigen Brennverlauf, die fehlende Aufladung und das größere Hubvolumen zurückzuführen. Der Dachbrennraum war durch die angepasste Kolbengeometrie stark zerklüftet. Die Zerklüftung führte zu einer unvollständigeren Verbrennung wodurch die Effizienzgewinne verringert wurden. Trotz des hohen Verdichtungsverhältnisses wurden die NO_x -Emissionen im Vergleich zu Benzin durch die Verwendung einer Mehrfacheinspritzung am Höchstlastpunkt um ~20% reduziert. Die PN-Emissionen und die FID-ermittelten VOC-Werte waren trotz Mehrfacheinspritzung und Oxygenatkraftstoff auf dem Benzin-Referenzniveau. Die erhöhten PN-Emissionen waren auf die nicht optimierten Prototypenkolbengeometrie und auf die nicht angepassten Kolbenringe zurückzuführen, die einen hohen Öleintrag in den Brennraum verursachten. Nichtsdestotrotz bestand die Annahme der Simulation, dass auch bei diesen hohen Verdichtungsverhältnissen und Lasten eine klopfende Verbrennung ausbleibt.

Methanol zeigte bei identischen Versuchsparametern ebenfalls keine Anzeichen einer klopfenden Verbrennung. Das Schadstoffverhalten war ähnlich. Der indizierte Wirkungsgrad war mit 43,7 % im Vergleich zu C65F35 um 1,8% abs höher. Dies war hauptsächlich auf geringere Verluste aufgrund einer schnelleren Energieumsetzung zurückzuführen.

Die Vorversuche am Einzylinder legten nahe, dass mit einem moderateren Verdichtungsverhältnis von 15 bei unveränderter Zylinderkopfgeometrie bessere Ergebnisse darstellbar sind. Daher wurde für C65F35 am Vollmotor ein Kolben mit $\epsilon=15$ untersucht. Das Kolbendesign wurde mittels 3D-CFD optimiert [52]. Am Punkt der maximalen Effizienz erreichte der Motor einen effektiven Wirkungsgrad von 41%. Dies entsprach einer Verbesserung von 4,6 %abs im Vergleich zu der mit Benzin betriebenen, aktuellen Serienbasis. Wie am Einzylindermotor führte der Einsatz der Kolben mit gesteigertem ϵ zu einer Zunahme von VOC- und PN-Emissionen. Durch ein optimiertes Kolbenhemd wurde der PN-Vorteil des Kraftstoffes wiederhergestellt. Im dynamischen Fahrbetrieb, hier gezeigt Ergebnisse für RDE und WLTC, wurde ein Wirkungsgradvorteil von 8% respektive 9% im Vergleich zum Serienkolben realisiert. Dabei konnten die Rohemissionen von CO, CH₄, NO_x und PN weiter reduziert werden. Die VOC-Rohemissionen stiegen ähnlich wie zuvor am Einzylindermotor um 86% an.

Zusätzlich wurden am Vollmotor zwei Hochenergie-Zündkonzepte an sieben WLTC relevanten Betriebspunkten untersucht. Sowohl passive Vorkammer als auch Coronazündung erweiterten die Magerlaufgrenze und steigerten die Effizienz um weitere 4% abs. Der WLTC repräsentative NO_x -Grenzwert von 0,233 g/kWh konnte im Magerlauf nicht an allen Punkten eingehalten werden. Das Corona-Zündsystem überschritt diesen NO_x -Grenzwert nur am höchsten untersuchten Lastpunkt (2500 U/min, 13 bar p_{me}).

Individueller Beitrag an der Publikation:

Aufbauend auf der bisher veröffentlichten Literatur leitete der Autor die Idee zur vorliegenden Publikation ab und konzipierte diese. Er leitete die Simulation, Konstruktion und Fertigung des Eps. 19.6 Kolbens an. Er plante und führte alle Messungen am Einzylinderprüfstand durch. Er war maßgeblich für die Erstellung und Simulation des TPA-Modells zur Bewertung des Brennverlaufs und der Wirkungsgradanalyse verantwortlich. Die Versuchsergebnisse wurden vom Autor ausgewertet, interpretiert und tiefgreifend diskutiert. Das Manuskript der Publikation wurde vom Autor verfasst und vom Autor um die Anmerkungen der Co-Autoren erweitert. Die Kritik der Gutachter wurde, wo erforderlich, ebenfalls vom Autor in die finale Fassung eingearbeitet.

Die Messungen am Vollmotorprüfstand wurden federführend von den Co-Autoren Thamm, Retzlaff und Gadomski durchgeführt, ausgewertet und beschrieben. Der Autor war bei der Interpretation und Diskussion der Vollmotoreergebnisse beteiligt.

Zusätzliches Ergebnis: Wirkungsgradanalyse mittels 1-D Simulation

Mittels Druckverlaufsanalyse in GT-Power ist es möglich, die Wandwärmeverluste und die Verluste aus dem Brennverlauf zu quantifizieren. In Abbildung 23 sind beide Verluste für die zwei Kolbenvarianten und Kraftstoffe von 9 bis 15 bar p_{mi} dargestellt.

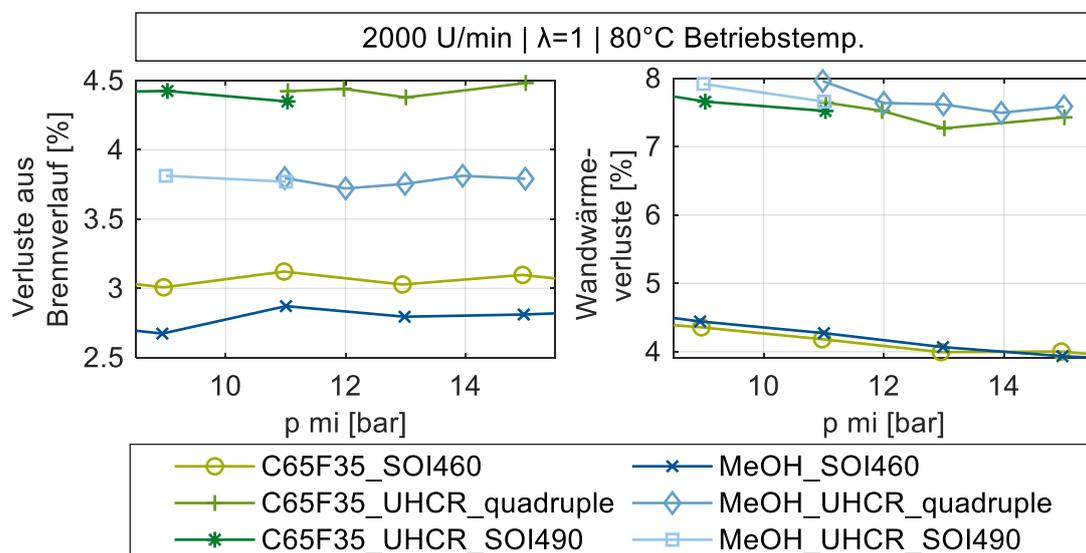


Abbildung 23: Wandwärme- und Brennverlaufsverluste: C65F35 – MeOH – Kolbenvariation

Durch die höhere Verdichtung steigen die Wandwärmeverluste für beide Kraftstoffe von 4 auf 8% an. Anhand der Verluste aus dem Brennverlauf wird der Einfluss der höheren laminaren Brenngeschwindigkeit von MeOH im Vergleich zu C65F35 deutlich. Durch die Verwendung von MeOH ist im Vergleich zu C65F35 ein höherer Wirkungsgrad darstellbar.

5 Diskussion

Forschungsziel 1: Einsatz und Anpassung eines FTIR-Abgasanalyse-systems zur detaillierten Analyse der Abgaszusammensetzung

Im Jahr 2020 boten FTIR-Hersteller validierte Methoden nur für konventionelle fossile und biogene Kraftstoffe an. Diese Methoden inkludierten Komponenten wie CH_2O , CH_4 und MeOH. Allerdings waren die Kalibrationsgrenzen dieser Komponenten für neuartige Kraftstoffe nicht immer ausreichend. Wurden unkonventionelle Kraftstoffe wie zum Beispiel MeFo oder DMC verwendet, so waren diese Kraftstoffmoleküle nicht in den Methoden inkludiert. Für ein erstes Abgas-Screening von neuartigen Kraftstoffen konnten die vorhandenen Methoden ohne Anpassung genutzt werden. In diesem Fall mussten mögliche Methodenfehler bei der Interpretation der Messwerte beachtet werden [28]. Im FTIR-Review von Giechaskiel (Gemeinsame Forschungsstelle der EU-JRC) wurden zahlreiche FTIR-Messungen während des Entwicklungsprozesses und zur Bewertung von unkonventionellen Kraftstoffen sowie zur Untersuchung bisher nicht reglementierter Schadstoffen aufgezählt [165]. Giechaskiel befand, dass vor einer Einführung des FTIR in den Homologationsprozess insbesondere Querinterferenzen ausgeschlossen werden müssten. Zudem wäre die Messung einzelner VOC-Komponenten mit höheren Abweichungen verbunden als die Bestimmung der Standardschadstoffe.

In der vorliegenden Dissertation wurde mit einer FTIR-Methodenanpassung aufgezeigt, wie eine konventionelle Methode an einen neuartigen Kraftstoff angepasst werden kann. Dadurch konnten Methodenfehler ausgeschlossen und gasförmige Emissionen detailliert bewertet werden. Durch den Einsatz des FTIR mit angepasster Methode war es möglich reglementierte und nicht reglementierte gasförmige Schadstoffe zu evaluieren und somit die erste Forschungsfrage zu beantworten. Der durchgeführte Validierungsprozess war erforderlich, um Querinterferenzen zu finden und auszuschließen. Der Prozess zur Entwicklung der Methode war zeitaufwändig und kostenintensiv. Dies resultierte aus der Notwendigkeit, das Expertenwissen des Herstellers zur Anpassung einer vorhandenen Basismethode zu nutzen. Darüber hinaus erforderte es Prüfstandsversuche zur Validierung und Kalibrierung neuer Abgasbestandteile.

Sobald sich durch FTIR-Screeningversuche vielversprechende Kraftstoffe herauskristallisieren, sind kraftstoffspezifische Methoden zur detaillierteren Untersuchung notwendig [17, 32, 230]. Dass ein Bedarf an neuen Methoden vorhanden war, zeigte sich im Angebot der Hersteller. Ende 2023 waren zusätzliche Methoden für synthetische Kraftstoffe wie Methanol oder Wasserstoff [231] verfügbar. Die MeOH-Methode wurde verwendet, um die TUM-Methode weiter zu validieren, da zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertation keine Fortschritte in der Entwicklung der C65F35-Methode vorlagen. Zur Bewertung der TUM-Methode wurde ein direkter Vergleich der Ergebnisse beider Methoden im Motorbetrieb mit MeOH durchgeführt. Die Auswertung mit der DMC/MeFo-Methode lieferte im Vergleich zur kommerziellen MeOH-Methode des Herstellers nahezu identische Emissionswerte. Diese Übereinstimmung stützt die Qualität und Validität der TUM-Methode. Die Kalibrierungsgrenze der MeOH-Komponente wurde bei einem

MeOH-Anteil im Abgas von über 3000 ppm erreicht, weshalb auf den Einsatz der TUM-Methode in diesem Bereich verzichtet werden musste. Die neue, kommerzielle MeOH-Methode hingegen konnte bis zu einer MeOH-Konzentration von 2 vol% eingesetzt werden und wurde daher für die Kaltstartversuche verwendet.

Detaillierte Analyse der Abgaszusammensetzung der C1-Oxigenate

Zur Erreichung des ersten Forschungsziels, wurde eine detaillierte Untersuchung der Zusammensetzung des Abgases aus dem Motorbetrieb mit den C1-Oxygenaten durchgeführt. Die angepasste TUM-Methode für das FTIR erlaubte eine umfangreiche Evaluierung bisher nicht reglementierter Schadstoffe, wie beispielsweise NH_3 , CH_4 und CH_2O . Im Normalbetrieb wurden mit den C1-Oxygenatkraftstoffen, analog zur Begrenzung der reglementierten gasförmigen Schadstoffe, die nicht reglementierten durch den Einsatz eines TWC mit geeigneter Motorsteuerung auf ein Minimum reduziert.

Im stöchiometrischen Normalbetrieb waren somit die Partikelemissionen von größerer Bedeutung. Im Gegensatz zum Motorbetrieb mit C65F35 und M65F35 traten für M100 und M85F15 im Niedriglastbereich mit seitlicher Direkteinspritzung erhöhte PN10-Emissionen auf. Dieses Ergebnis war überraschend, da MeOH als Vertreter der C1-Oxygenatkraftstoffe idealerweise rußfrei verbrennen sollte. Ein PN10-Anstieg im Niedriglastbereich wurde für MeOH an anderen Prüfständen bestätigt [155, 156, 175]. Harrington benannte in [156] keine Ursache, verwies aber auf volatile Bestandteile wie Öltröpfchen. Der Bericht des IFKMs befand die PN-Emissionen für reines Methanol insgesamt auf unkritischem Niveau [175]. Dennoch wurden in diesem Bericht erhöhte PN-Emissionswerte im Niedriglastbereich publiziert.

Die erhöhten PN10-Emissionen im Niedriglastbereich könnten darauf zurückzuführen sein, dass zusätzliche volatile Bestandteile aufgrund einer unzureichenden Abscheidung als Festkörperpartikel im CPC mitgezählt werden. Somit begründeten sich die erhöhten PN10-Emissionen in einem Messfehler. Die volatilen Bestandteile werden standardmäßig durch eine Evaporation-Tube (ET) unschädlich gemacht. Diese könnte für den Betrieb mit reinem C1-Oxygenatkraftstoff nicht ausreichend sein. Gegen die Hypothese sprechen die Vorversuche von Maier zum vorliegenden Messsystem [28]. In den Versuchen wurde gezeigt, dass die Standard-ET in der Lage sein sollte, die volatilen Bestandteile im Betrieb mit Oxygenatkraftstoffen abzuscheiden. Die weiterführenden Messungen am TUM-Einzylindermotor, wie in [232] beschrieben, umfassten neben dem Standardaufbau der SPCS auch einen Versuchsaufbau mit einem Catalytic-Stripper zur Entfernung volatiler Bestandteile. Trotz dieser Ergänzung zeigten sich weiterhin erhöhte PN10-Werte im Niedriglastbereich, was die Hypothese eines Messfehlers weiter entkräftete.

Eine mögliche Ursache der Partikelbildung am Einzylinder-Versuchsmotor war die Interaktion von Kraftstoff und Liner. In der Erörterung dieser Theorie für direkteinspritzende Ottomotoren in [233] wurden erhöhte PN10-Emissionen auf metallische Öl-Additive zurückgeführt. Bock erklärte, dass ein Kraftstoffeintrag auf die Laubuchse die Oberflächenspannung und Viskosität des anliegenden Ölfilms beeinträchtigt. Dadurch lösten sich vermehrt Öl-/Kraftstofftröpfchen von der Wand ab und bildeten eine PN-Quelle. Dass vor allem bestimmte Öladditive für kleine Partikel verantwortlich sind, deckt sich mit den Ergebnissen des FVV-Projekts 1374 [154]. Diese Partikelbildung wird schematisch in Abbildung 24 dargestellt. Der rot markierte Kraftstoffstrahl trifft aufgrund seiner Länge den Liner und interagiert dort mit Öl. Es kommt in diesem Bereich zur Partikelbildung.

Besonders kritisch war die erhöhte Eindringtiefe im Niedriglastbereich und bei geringen MeFo-Kraftstoffanteilen. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 24 die Kraftstoffsprays von Benzin

und M85F15 abgebildet. Die zwei Bilder wurden 400 μs nach Ende der Bestromung des Injektors aufgenommen. Die Versuchsparameter für die Spraymessungen approximierten die Motorbedingungen am Niedriglastpunkt für den jeweiligen Kraftstoff. Eine detaillierte Auswertung findet sich in der zugehörigen Publikation. Ein hoher MeFo-Anteil von 35 vol% begünstigte die Verdampfung und führte somit zu einer Reduzierung der Eindringtiefe des flüssigen Sprays. Unabhängig vom MeFo-Anteil war die Eindringtiefe des Sprays für die C1-Oxygenate im Vergleich zu Benzin erhöht, da die eingebrachte Kraftstoffmasse für die C1-Oxygenatkraftstoffe im Vergleich zu Benzin etwa doppelt so hoch war. Es war daher zu erwarten, dass die Wechselwirkung zwischen Kraftstoff und Laufbuchse, insbesondere bei niedrigem MeFo-Anteil im Vergleich zu Benzin, verstärkt wurde, was wiederum die ölunduzierten PN10-Emissionen erhöhte.

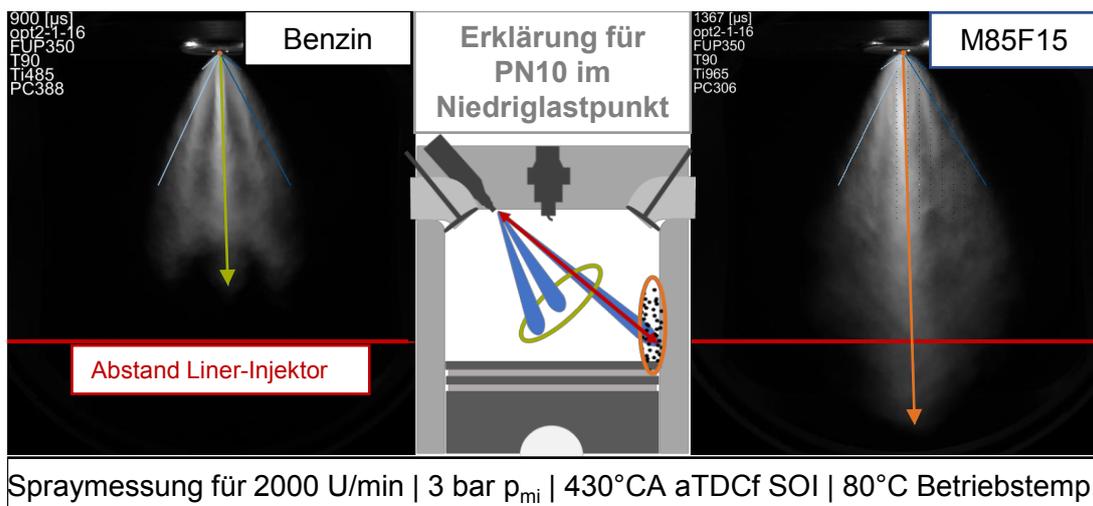


Abbildung 24: Veranschaulichung der PN10-Quelle im Niedriglastbereich

Die Spraymessungen dienen einem qualitativen Vergleich der Eindringtiefe im Brennraum, da der Einfluss der Ladungsbewegung auf die Spraylänge in der Kammer nicht erfasst werden konnte. Eine Kombination aus der Auswertung der Sprayaufnahmen mit einer 3D-CFD-Simulation würde es ermöglichen, den Einfluss quantitativ zu bewerten. Eine solche Simulation wurde von Wouters basierend auf vergleichbaren Spraymessungen erstellt [35]. In der Simulation bestätigte sich, dass durch eine Methanoleinspritzung im Vergleich zum Betrieb mit Benzin eine erhöhte Spray-Liner-Interaktion auftrat, was die Interaktions-Hypothese weiter unterstützte.

Durch eine zentrale Einspritzung mit adäquatem Spraytarget (Z-DI2), konnte der PN10-Anstieg im Niedriglastbereich vermieden werden. In diesem Fall war aufgrund der vorteilhaften Sprayausrichtung die Spray-Liner-Interaktion reduziert. Wurde jedoch ein Zentral-Injektor mit suboptimalem Spraytarget (Z-DI1) verwendet, blieben die PN10-Emissionen für Methanol auf hohem Niveau [232]. In [232] wurden zusätzlich optische Messungen an einem Einzylinder-Glaslinermotor durchgeführt. Der Glaslinermotor basierte ebenfalls auf dem EA888 und wurde mit identischem Aufbau, gleichem Injektor und gleicher Zündkerze wie der Thermodynamikmotor betrieben. Kolben und Ventile wurden am Optikmotor konstruktionsbedingt verändert. Als Lastpunkt wurde ein p_{mi} von 11 bar ausgewählt, da hier die Zylinderdruckverläufe zwischen beiden Motoren nahezu identisch waren. Die optischen Messungen machten den im Vergleich zu Benzin erhöhten Kraftstoffeintrag auf den Liner sichtbar. Das nicht adäquate Spray-Target führte zu einer Spray-Liner-Interaktion. Somit könnten sich die hohen PN10-Emissionen im Niedriglastbereich in den Publikationen mit zentraler Injektorlage [156, 175] ebenfalls durch die Interaktionshypothese erklären lassen.

In den Motorversuchen mit Saugrohreinspritzung von Catapano [155] wurden im Niedriglastbereich hohe PN10-Emissionen gemessen. Der Einsatz einer Saugrohreinspritzung sollte den Kraftstoff-Laufbuchsen-Kontakt reduzieren, sodass ein weiterer PN-Bildungsmechanismus auftreten müsste. Geng untersuchte MeOH-Benzin-Blends am Vierzylindermotor mit Saugrohreinspritzung [234]. Er beobachtete, dass der Einsatz von 45 vol% MeOH in Benzin zu erhöhten PN-Emissionen führte. Die Hypothesen von Geng und Catapano konnten nicht die erhöhten PN10-Emissionen in dieser Arbeit erklären. Beispielsweise führte eine geringere Abgastemperatur nicht zu einer Zunahme der PN-Emissionen. Geng erwähnte jedoch, dass auch für Motoren mit Saugrohreinspritzung das Motoröl eine Ursache für die erhöhte PN-Bildung war.

Zusammengefasst unterstützen die Ergebnisse der Sprayversuche, der 3D-CFD-Simulationen und der Versuche am Einzylindermotor mit zentralem Injektor die Hypothese, dass die erhöhten PN10-Emissionen im Niedriglastbereich auf eine Spray-Liner-Interaktion zurückzuführen sind. Insbesondere die ergänzenden optischen Aufnahmen am Glaslinermotor tragen zu dieser Bestätigung bei. Durch die erfolgreiche, detaillierte Analyse der Abgaszusammensetzung wurde das erste Forschungsziel erreicht. Nachdem die gasförmigen Schadstoffe im betriebswarmen Zustand durch einen Dreiwegekatalysator aus dem Abgas entfernt wurden, fokussieren sich die nachfolgenden Optimierungen auf die Steigerung des Wirkungsgrades und die Minimierung der Partikelemissionen.

Forschungsziel 2: Einsatz von moderner Injektortechnologie für C65F35/MeOH

In den dieser Arbeit zugrundeliegenden Publikationen wurde gezeigt, dass die moderne Injektortechnologie nutzbringend für die C1-Oxygenate eingesetzt werden kann. Nachfolgend wird der Einsatz im betriebswarmen Zustand und unter Kaltstartbedingungen sowie die Konstruktionsanpassungen diskutiert.

Im betriebswarmen Zustand:

Die Ermittlung einer optimalen Einspritzstrategie für die Oxygenatkraftstoffe hängt stark vom Motoraufbau ab. Beispielsweise war für den Versuchsmotor von Harrington der optimale Einspritzzeitpunkt für Benzin vergleichbar zu dem von MeOH [156]. Harrington wies explizit darauf hin, dass eine Sensitivitätsanalyse für einen sinnvollen Vergleich verschiedener Kraftstoffe notwendig wäre.

Diese Aussage bestätigte sich in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen am Einzylindermotor. Es wurden erhebliche Wirkungsgradeinbußen für die Oxygenatkraftstoffe mit Benzin-Referenztiming festgestellt. Dies lag maßgeblich daran, dass eine deutlich erhöhte Kraftstoffmasse bei Tumble-behinderndem Einspritzbeginn in den Brennraum eingebracht wurde. Bestätigt wurde diese Beobachtung von Wagner durch eine 3D-CFD Simulation des Einzylindermotors mit Referenztiming beider Kraftstoffe [52]. Er zeigte, dass für C65F35 mit Referenztiming die Tumble-Richtung umgekehrt wurde und dadurch die turbulente kinetische Energie zum Verbrennungsbeginn reduziert war. Er folgerte, dass der Einspritzzeitpunkt eine wichtige Steuerungsgröße für den Einsatz eines Oxygenatkraftstoffs wäre.

In Anbetracht der Wechselwirkung zwischen Einspritzstrategie und Motordesign werden folgend Versuche erörtert, die auf dem EA888-Grundmotor aufbauen. In den dieser Arbeit vorausgehenden C65F35-Publikationen [43, 45] wurde ein Anstieg der PN-Emissionen im Hochlastbetrieb gegenüber der Niedriglastpunkte festgestellt. In den Ergebnissen am Einzylindermotor und am

Vollmotor waren die Hochlastpunkte mit einem circa zehnfach erhöhten PN-Ausstoß verbunden. Am Einzylinder wurden die Hochlastpunkte mittels Benzinreferenztiming untersucht. Am Vollmotor wurde ein effizienzoptimaler, früher Einspritzzeitpunkt beibehalten und zusätzlich eine zweite, späte Kompressionseinspritzung hinzugefügt. Diese Einspritzstrategie führte zu einem PN- η Trade-off. [43, 45]

Im Ergebnisteil dieser Arbeit wurde in Versuchen am Einzylindermotor gezeigt, dass der PN-Anstieg am Höchstlastpunkt durch eine Frühverschiebung des Einspritzzeitpunktes verhindert werden konnte. Dies war mit einer sinkenden Effizienz verbunden. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der PN-Emissionen war eine Einspritzung spät während der Kompression. Sowohl ein sehr später als auch ein sehr früher Einspritzzeitpunkt führten dazu, dass die Spray-Liner-Interaktion durch eine Spray-Kolben-Interaktion ersetzt wurde. Durch eine späte Kompressionseinspritzung wurden die NO_x -Emissionen und der Wirkungsgrad verringert, ebenso beobachtet von Duan [179] in Versuchen am Einzylindermotor mit MeOH. Eine direkte Kühlung des Brennraums während der Kompression zur NO_x -Reduktion bei gleichzeitig sinkender volumetrischer Effizienz waren vom Motordesign unabhängige Phänomene. Wurde ein Großteil des Kraftstoffs während der Kompression eingespritzt, so war ein Anstieg an nicht oder nicht vollständig verbrannten Komponenten wie CO , CH_2O und CH_4 zu verzeichnen. In Kapitel 4.2 wurde gezeigt, dass MeFo als volatile Blendkomponente die Gemischaufbereitung späterer Einspritzzeitpunkte verbesserte, allerdings ein Effizienznachteil bestehen blieb.

Der PN- η Zielkonflikt, der sowohl am Einzylindermotor als auch am Serienmotor auftrat, wurde durch den Einsatz der im Ergebnisteil vorgestellten Mehrfacheinspritzung gelöst. Voraussetzung für eine derartige Einspritzstrategie war ein moderner Injektor, der mehrmals während eines Arbeitsspiels präzise aktuiert werden konnte. 75% des Kraftstoffs wurden mit drei Einspritzungen während des Ansaugtaktes eingebracht und lediglich 25% während der Kompression. Dies ermöglichte, unabhängig vom Kolbendesign ($\epsilon=11/19,6$), reduzierte PN-Emissionen bei vernachlässigbarem Einfluss auf die Effizienz. Duan nutzte in [178] eine ähnliche Split-Einspritzstrategie zur zusätzlichen Verbesserung der Klopffestigkeit von MeOH. 12,5% Kraftstoff wurden in dieser Publikation bei 660°CA aTDCf eingespritzt, um kloppfrei eine Vollast bei $\epsilon=15$ zu ermöglichen.

Für Methanol oder C65F35 waren zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit keine weiteren detaillierten Untersuchungen zur Schadstoffreduktion im betriebswarmen Motor mittels Mehrfacheinspritzungen bekannt. Dass Mehrfacheinspritzungen insbesondere für sauerstoffhaltige Kraftstoffe großes Potenzial haben, zeigte auch Singh für Ethanol-Benzinblends, die bis zu 85 vol% Ethanol (E85) enthielten [40]. Am Vollmotor mit Zentraleinspritzung wurden bis zu drei Einspritzungen pro Arbeitsspiel und ein Kraftstoffdruck von 20 MPa eingesetzt. Besonders vielversprechend war der Einsatz der Mehrfacheinspritzung ebenfalls für hohe Lasten. Für E85 und Zentraleinspritzung konnte die Effizienz um 2,3%rel gesteigert werden, während die PN-Emissionen um 99%rel sanken. Um dies zu erreichen, wurde 80% des Kraftstoffs über zwei Einspritzungen während der Ansaugung und 20% mit einem SOI von 660°CA aTDCf eingespritzt.

Unter Kaltstartbedingungen:

Der Kaltstart stellt Oxygenate wie Methanol mit hoher Kühlwirkung und ohne volatile Bestandteile vor große Herausforderungen hinsichtlich Startfähigkeit und Schadstoffemissionen [16]. Die Startfähigkeit ist für direkteinspritzende Motoren weniger problematisch [183, 235] als für Motoren mit Saugrohreinspritzung. In [183] wurde am Vollmotor mit MeOH als Kraftstoff demonstriert, dass mit einer Mehrfacheinspritzung ein Kaltstart bei -20°C Motortemperatur unproblematisch war. Ein negativer Einfluss der Direkteinspritzung auf das Motoröl wurde festgestellt. Dabei

wurde besonders kritisch der Methanoleintrag während der Warmlaufphase bewertet. Im Kaltstart ist eine Realisierung minimaler Schadstoffemissionen auch mit den C1-Oxygenatkraftstoffen eine Herausforderung. In den Versuchen von Blochum [45] mit C65F35 und M70F30 führten kältere Betriebstemperaturen von -5°C zu erhöhten reglementierten Schadstoffemissionen.

In der vorliegenden Arbeit wurde erstmals das Emissionsverhalten von C65F35 und Methanol unter kalten Temperaturen von -5°C durch Einsatz von FTIR- und Partikelmesstechnik detailliert untersucht. Wie bei den reglementierten Schadstoffen wurden auch bei den nicht reglementierten Schadstoffen hohe Konzentrationen festgestellt. Zum Beispiel wurden im Methanolbetrieb am Referenzpunkt mehr als 7000 ppm unverbranntes MeOH, über 50 ppm Ameisensäure und über 600 ppm Formaldehyd im Abgas gemessen. Eine späte Einfacheinspritzung während der Kompression wurde angewandt, um den Kraftstoffeintrag in das Motoröl zu minimieren und zugleich Partikel und NO_x -Emissionen zu reduzieren. Durch die Kompressionseinspritzung von C65F35 wurde der PN-Ausstoß am 7 bar p_{mi} Lastpunkt im Vergleich zur Benzinreferenz um den Faktor 10 reduziert, während die NO_x -Emissionen von 2400 ppm auf 850 ppm gesenkt wurden. Die VOC-Emissionen blieben unabhängig vom Einspritzzeitpunkt auf hohem Niveau. Diese Ergebnisse zeigten wirksame Maßnahmen auf, um die Vorteile der C1-Oxygenate im Vergleich zu Benzin unter schwierigen Kaltstartbedingungen zu nutzen. Weitere Optimierungsmaßnahmen sind erforderlich, um den Schadstoffausstoß während des Kaltstarts zu minimieren. Vielversprechende, technische Möglichkeiten werden im Ausblick dieser Arbeit erörtert.

Mit Konstruktionsanpassung:

Neben der Optimierung der Steuerung wurde in der vorliegenden Dissertation ein modernes Einspritzsystems konstruktiv an die C1-Oxygenatkraftstoffe angepasst. Insbesondere wurden Injektoren untersucht, die an die Eigenschaften von C65F35 angepasst waren.

Keine weiteren Publikationen sind gegenwärtig bekannt, die dedizierte Injektoren für C65F35 behandeln. Im Meemo-Projekt [42] wurde die Entwicklung eines Einspritzsystems für Methanol vorgestellt. Wie in dieser Dissertation wurden Messdaten vom Kraftstoffspray und vom Einspritzverlaufsindikator verwendet, um die Prototypen und deren Einfluss auf den Sprayaufbruch verschiedener Kraftstoffe zu untersuchen. Für die MeOH-Injektoren wurde das Spraytarget der Injektoren mittels 3D-CFD optimiert. Ziel war eine möglichst gute Gemischbildung und eine geringe Wandfilmbildung. Für die C65F35-Injektoren wurde das Serien- bzw. ein um 5° aufgefächertes Targeting verwendet. Die im Meemo-Projekt entwickelten Injektoren mit hohem Durchfluss kavitierten während eines Dauertests in den Spritzlöchern. Dies führte zu massiven Erosionsschäden und zum Versagen der Injektoren. Diese Ergebnisse konnten nicht direkt auf die flussangepassten C65F35-Injektoren übertragen werden, da die Dauerfestigkeit der Injektoren nicht untersucht wurde. Der meistgenutzte TUM-Injektor (Typ G-DI) wurde zur näheren Untersuchung an den Hersteller übergeben, um kraftstoffspezifische Schädigung der internen Bauteile zu bewerten. Während der Versuchszeit am Einzylindermotor kam es zu keiner Schädigung [236].

Am Einzylindermotor konnte der Kraftstoffdruck von 35 auf 10 MPa gesenkt werden, indem der für C65F35 optimierte EF-00 Injektor verwendet wurde. Bei einer Drehzahl von 2000 U/min wurden keine nachteiligen Effekte auf die Schadstoffemissionen und die Verbrennungsstabilität festgestellt. Der gesamte Lastbereich von 3 bis 17 bar p_{mi} wurde untersucht. Gerade die Hochlastbetriebspunkte spielten aufgrund des im Vergleich zu Benzin erhöhten Kraftstoffbedarfs eine kritische Rolle. Harrington [156] konnte ebenfalls an einem Hochlastbetriebspunkt (3000 U/min, 16 bar p_{me}) den Kraftstoffdruck für MeOH von 20 auf 5 MPa reduzieren. Dabei zeigten sich NO_x -

Nachteile mit sinkendem Kraftstoffdruck. Allerdings blieb der Wirkungsgrad von 20 bis etwa 7,5 MPa nahezu konstant. Die Verwendung passender Injektoren für den jeweiligen Motor und Kraftstoff ist notwendig, um das gesamte Potenzial der C1-Oxygenate auszuschöpfen. Die angepassten Injektoren dieser Arbeit demonstrierten einen möglichen ersten Schritt in Richtung optimierter Hardware.

Aus der 3D-CFD des Motors wurde von Wagner abgeleitet, dass die Injektorposition eine weitere wichtige Einflussgröße auf die Gemischaufbereitung der Oxygenatkraftstoffe darstellt [52]. Im Versuchsteil dieser Arbeit wurde für das EA888-Motordesign festgestellt, dass ein strahlgeführtes Einbringen der C1-Oxygenatkraftstoffe durch eine zentrale Injektorposition Vorteile gegenüber der serienmäßigen, seitlichen Injektorlage bot. Insbesondere ermöglichte die zentrale Injektorposition die Vermeidung einer Spray-Liner-Interaktion, was wiederum einen wirkungsgradoptimalen Einspritzzeitpunkt über die gesamte Motorlast hinweg ermöglichte, ohne dass die PN-Emissionen anstiegen.

Da keine weiteren Untersuchungen zu einer optimierten Injektorlage für den EA888-Motor bekannt waren, ist es erwähnenswert, auch die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, die Direkteinspritzung mit einer Saugrohreinspritzung zu kombinieren. Diese Option könnte mit dem EA888-Motor realisiert werden, der werkseitig mit zusätzlichen Saugrohrinjektoren ausgestattet war. Die einzige, relevante Publikation diesbezüglich ist von Shen, der in [237] einen Dual-Fuel-Betrieb mit MeOH-Direkteinspritzung und Benzin-Saugrohreinspritzung untersuchte.

Zusammenfassend führte der Einsatz eines modernen, angepassten Einspritzsystems zu Vorteilen im Betrieb mit den C1-Oxygenaten C65F35 und MeOH. Durch die Optimierung der Einspritzstrategie unter Normal- und unter Kaltstartbedingungen wurde die Motorperformance sowie das Schadstoffverhalten verbessert. Ebenso wurde am Einzylindermotor erfolgreich demonstriert, dass durch eine Anpassung von Injektordesign und Injektorposition weitere Potenziale erschlossen werden können. Das zweite Forschungsziel wurde somit erreicht.

Forschungsziel 3: Effizienzmaximierung durch Kolbenanpassung und Übertrag auf einen realitätsnahen, dynamischen Betrieb

Wie in Abbildung 25 dargestellt, werden erst die Ergebnisse der Versuche am Einzylindermotor und anschließend die des Vierzylindermotors diskutiert. Weiterhin ist für die Diskussion relevant, dass mit zunehmenden ϵ der Kolbenaufbau immer höher wird, wenn das Verdichtungsverhältnis ausschließlich über das Kolbendesign angepasst wird. In dieser Abbildung wird ersichtlich, dass der Kolbenboden mit niedrigstem Verdichtungsverhältnis flach ist. Der Basiskolben des Einzylindermotors weist zwei seitlich Höcker auf. Zum Erreichen von $\epsilon=15$ wurde die Mulde aufgefüllt. Für $\epsilon=20$ war es notwendig die Ventiltaschen zu schließen. Im mittleren Bereich des Kolbens wurde ein kugelförmiger Bereich ausgespart, um eine Kollision mit der Zündkerze zu vermeiden.

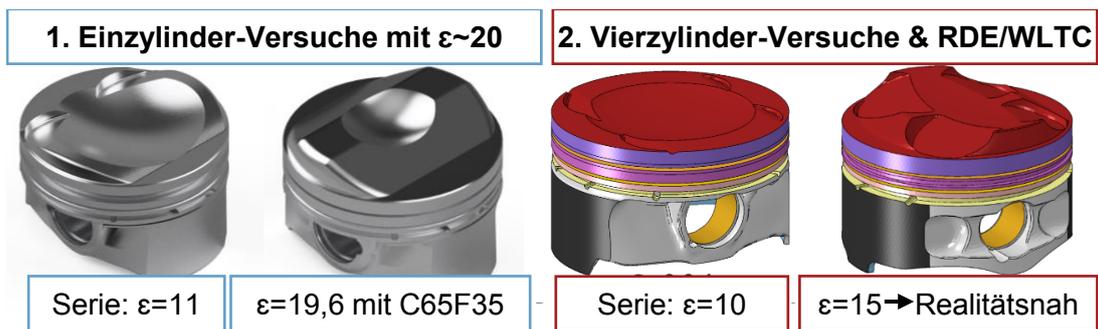


Abbildung 25: Diskussion Effizienzmaximierung durch Kolbenaufbau

Die präsentierten Versuche mit weiter erhöhtem Verdichtungsverhältnis bestätigten erstmals für das EA888-Motordesign die Ergebnisse anderer Institute. Eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses durch Anpassung des Kolbendesigns auf $\epsilon \sim 20$ führte zu einer gesteigerten Effizienz. Bei einer Last von 15 bar p_{mi} wurde der indizierte Wirkungsgrad im C65F35-Betrieb durch die Kolbenanpassung von 37,5% auf 41,9% gesteigert. Mit zunehmendem Verdichtungsverhältnis und entsprechendem Kolbenaufbau wurde der Brennraum stärker zerklüftet, was zu erhöhten VOC-Emissionen und einer verlangsamten Verbrennung führte. Diese zwei Beobachtungen waren in der zugehörigen Verlustteilung vergleichbar zu den Ergebnissen der Forscher an der RWTH Aachen, wenngleich in Aachen ein höherer maximaler Wirkungsgrad erreicht wurde [34]. Der Wirkungsgrad-VOC Trade-off wurde in weiteren Versuchen für verschiedene Oxygenate beobachtet [238]. Für C65F35 trat dieser Zielkonflikt sowohl am Einzylinder- als auch am Vollmotorprüfstand auf. Mittels FTIR-Analyse konnte erstmals der VOC-Emissionsanstieg in unverbranntem Kraftstoff und teilverbrannte Schadstoffe aufgeschlüsselt werden. Der Abgasanteil an unverbranntem Kraftstoff stieg um 130%, der Anteil an teilverbrannten Bestandteilen um 60%. Der VOC-Emissionsanstieg wurde in Teilen durch den Einsatz einer Mehrfacheinspritzung kompensiert.

Durch den Einsatz von Prototypenkolben mit höheren Verdichtungsverhältnissen stiegen die PN-Emissionen an. Sowohl der von Blochum [43] eingesetzte $\epsilon=15$ als auch der $\epsilon=19,6$ Kolben führten zu erhöhten Partikelemissionen, die auf Öl-Reverse-Blow-by zurückgeführt wurden. Dies wäre für eine Serienanwendung kritisch, da Festkörperpartikel nicht durch den notwendigen TWC eliminiert werden. Die Ergebnisse unterstrichen die Notwendigkeit, Effizienzoptimierungen auch hinsichtlich der Schadstoffemissionen zu untersuchen.

Der Betrieb wurde mit $\epsilon \sim 20$ in den vorliegenden Versuchen bis 15 bar p_{mi} untersucht. Kraus entwickelte im Rahmen des Namosyn-Projektes einen kraftstoffangepassten Zylinderkopf und untersuchte diesen am Einzylindermotor [239]. Die Optimierung des Zylinderkopfs verfolgte das Ziel über eine Anpassung der Einlasskanalgeometrie den Wirkungsgrad zu steigern. Dieses Ziel wurde nicht erreicht. Allerdings konnte der Lastbereich weiter erhöht werden. Der Betrieb war bis 17 bar p_{mi} mit einem ϵ von 19,6 möglich. Der Verbrennungsschwerpunkt bei 8°CA aTDCf wurde beibehalten. Der Betrieb erfolgte mit einer Einfacheinspritzung bei 430°CA aTDCf . Diese war für den angepassten Zylinderkopf wirkungsgradoptimal. Die indizierten Zylinderdruckverläufe dieses Lastpunktes werden in Abbildung 26 dargestellt. Der über 200 Arbeitsspiele gemittelte Zylinderdruck ist in blau, die einzelnen Arbeitsspiele sind in grau dargestellt. Zum Vergleich ist der Graph in schwarz enthalten, der den gemittelten Zylinderdruck des Referenzmotors, betrieben mit Benzin abbildet. Ähnlich wie in den vorliegenden experimentellen Untersuchungen wurde auch im Betrieb mit C65F35 an diesem, höheren Lastpunkt keine klopfende Verbrennung

beobachtet. Die hohe Klopfestigkeit von C65F35 wurde somit nochmals bestätigt. Die diesbezüglichen Randbedingungen in den Simulationen aus [44, 52] waren gerechtfertigt.

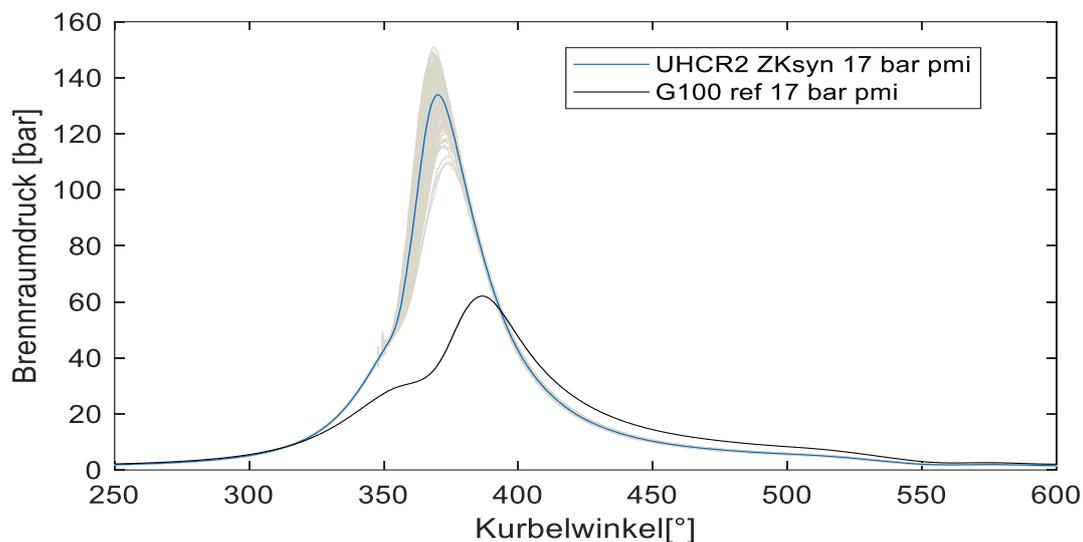


Abbildung 26: Zylinderdruckverläufe von C65F35: $\epsilon \sim 20$, 17 bar p_{mi} , 2000 U/min [239]

Nach der erfolgreichen thermodynamischen und emissionsbezogenen Bewertung des Betriebs mit einem Verdichtungsverhältnis von $\epsilon \sim 20$ und C65F35 sowie dem Vergleich mit Methanol wurde das Ziel verfolgt, einen realitätsnahen Benchmark durchzuführen. Zu diesem Zweck wurde ein niedrigeres Verdichtungsverhältnis von $\epsilon = 15$ gewählt, um unter anderem den Brennraum weniger stark zu zerklüften und den Anstieg des maximalen Zylinderdrucks geringer zu halten. Die eingesetzten Kolben wurden so ausgelegt und gefertigt, dass ein PN-Anstieg vermieden werden konnte. Die Vollmotorversuche mit diesen optimierten Kolben stellten in der MeOH/C65F35-Forschung ein absolutes Novum hinsichtlich eines realitätsnahen Betriebes mit aktuellem und angepasstem Motordesign dar. Keine der bisher aufgeführten Veröffentlichungen mit optimierten Motordesign untersuchte den dynamischen Betrieb. Erstmals wurden die vorhandenen Potenziale im RDE und WLTC demonstriert und dabei sowohl thermodynamisch als auch emissionstechnisch detailliert bewertet. Minimale gasförmige Schadstoffemissionen konnten unabhängig vom Kolbendesign mittels Dreibegekatalysator erreicht werden. Gleichzeitig wurde die Effizienz im Vergleich zur Benzinreferenz um 10%rel gesteigert. Das Forschungsziel der realitätsnahen Demonstration eines effizienteren und schadstoffärmeren Motors wurde erreicht.

Ob die aufgezeigten, minimalen Schadstoffemissionen über die Lebenszeit eines Fahrzeugs sichergestellt werden können, wurde für C65F35 bisher nicht untersucht. Alterungseffekte des Dreibegekatalysators müssten analysiert werden. In [240] wurde die Alterung von dedizierten Methanol-Fahrzeugen mittels des mittlerweile veralteten „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ erforscht. Durch den Alterungseffekt wurden nach über 160.000 gefahrenen Kilometern zum Teil über 50% mehr CO, THC, NO_x, MeOH und Formaldehyd im Betrieb ausgestoßen. Insgesamt wurde eine gute Servicekonformität für die Fahrzeuge festgestellt. Der Schadstoffemissionsanstieg war damit nicht gravierender als im Betrieb mit konventionellen Kraftstoffen.

6 Zusammenfassung

Die C1-Oxygenate MeOH und C65F35 können treibhausgasneutral genutzt werden und somit einen Beitrag zur Reduktion anthropogener THG-Emissionen leisten. Im Vergleich zu Benzin ermöglichen sie im Ottomotor reduzierte Schadstoffemissionen und eine höhere Effizienz. In dieser Arbeit wurde ein bestehendes Motorkonzept erfolgreich an die Eigenschaften der Kraftstoffe angepasst, um deren Potenzial weiter auszuschöpfen. Hauptversuchsträger dieser experimentellen Arbeit war ein Einzylinder-Forschungsmotor mit Direkteinspritzung. Nachfolgend werden die drei zentralen Forschungsziele erneut aufgegriffen und zusammenfassend beantwortet.

Ein FTIR-Messgerät mit geeigneter Methode ermöglichte eine **detaillierte Untersuchung der gasförmigen Abgaszusammensetzung von C1-Oxygenatkraftstoffen**. Um das erste Forschungsziel zu erreichen, wurde ein FTIR in den Prüfstandsaufbau integriert und dessen Auswertemethode an die verwendeten synthetischen Kraftstoffe angepasst. In der ersten Publikation wurde beleuchtet, wie eine adäquate Methode erstellt und validiert werden kann. Dies ermöglichte erstmals einen aussagekräftigen Benchmark bisher nicht reglementierter gasförmiger Emissionen. Anhand von Experimenten am Einzylindermotor unter Verwendung des FTIR wurde gezeigt, dass der Ausstoß von gasförmigen Schadstoffen durch den Einsatz eines Dreiwegekatalysators nahezu vollständig vermieden werden kann. Die Voraussetzung dafür waren eine betriebswarme Abgasnachbehandlung und eine präzise Lambdaregelung. Zusätzlich wurden die Partikelemissionen PN10 und PN23 analysiert und bewertet. Idealerweise entstehen bei der Verbrennung von C1-Oxygenaten nahezu keine Partikelemissionen. Dennoch wurden für C65F35 und MeOH erhöhte PN23-Emissionen ($\sim 10^5 \text{ \#/cm}^3$) im Hochlastbetrieb festgestellt. Anders als für Kraftstoffblends mit 35 vol% MeFo-Anteil, war im Methanolbetrieb ein Anstieg der PN10-Emissionen im Niedriglastbereich zu beobachten. Am Versuchsträger war der Kraftstoffeintrag auf die ölbenetzten Laufbuchse die primäre Partikelquelle im Betrieb mit den Oxygenatkraftstoffen.

Das zweite Forschungsziel war eine **Verbesserung der Motorperformance und eine Reduktion von Schadstoffen durch den Einsatz einer modernen Injektortechnologie**. Diese Arbeit zeigt das Potenzial moderner Einspritzsysteme in Kombination mit den Eigenschaften der C1-Oxygenatkraftstoffe. Da die gasförmigen Schadstoffe im Normalbetrieb durch den Dreiwegekatalysator konvertiert wurden, lag der Fokus der Optimierung auf minimalen Partikelemissionen bei maximaler Effizienz. Der PN-Ausstoß wurde für alle Betriebspunkte des Einzylindermotors auf ein Niveau gebracht, das sich in die Nähe des Umgebungsniveaus ($\sim 10^4 \text{ \#/cm}^3$) bewegt. Minimale PN-Emissionen ohne Effizienznachteil wurden am Einzylindermotor mittels zentraler Injektorposition erreicht. Für die seitliche Injektorlage musste eine Mehrfacheinspritzung für die Hochlastpunkte genutzt werden, um einen PN- η Zielkonflikt zu vermeiden. Die Ergebnisse mit Kraftstoff-angepasstem Injektordesign verdeutlichten, dass der für Benzin etablierte Kraftstoffdruck von 35 MPa im Normalbetrieb für C65F35 nicht notwendig war. Der Kraftstoffdruck konnte

durch flussangepasste Injektoren auf 10 MPa reduziert werden, ohne dass Nachteile hinsichtlich des Schadstoffausstoßes auftraten.

Unter Kaltstartbedingungen wurde der Betrieb mit C65F35 und MeOH am Einzylindermotor im Vergleich zu Benzin evaluiert. Nur für die beiden Oxygenate war der Einsatz einer späten Kompressionseinspritzung mit 35 MPa Kraftstoffdruck möglich. NO_x- und PN-Emissionen wurden mit dieser reduziert. Zusätzlich verringerte sich der Kraftstoff-Blow-by ins Kurbelgehäuse von etwa 15% auf unter 5%. Unabhängig vom Einspritzzeitpunkt lagen die VOC-Emissionen für beide Oxygenate auf einem hohen Niveau. Im Methanolbetrieb wurden über 7000 ppm unverbranntes Methanol, über 50 ppm Ameisensäure und über 600 ppm Formaldehyd im Abgas am Referenzbetriebspunkt gemessen.

Das dritte Forschungsziel war **die Bewertung eines erhöhten Verdichtungsverhältnisses von bis zu $\epsilon \sim 20$ für einen realitätsnahen Einsatz**. Für C65F35 zeigte der Einsatz eines höheren Verdichtungsverhältnisses sowohl am Einzylinder- als auch am Vierzylindermotor eine Wirkungsgradsteigerung. Das Verdichtungsverhältnis wurde über die Kolbengeometrie gesteigert. Im Vergleich zum aktuellen Benzin-Serienmotor wurde der Wirkungsgrad mittels $\epsilon = 15$ und C65F35 im dynamischen Betrieb (RDE/WLTC) am Vierzylindermotor um 10% gesteigert. Dass auch der $\epsilon \sim 20$ Betrieb mit C65F35 prinzipiell möglich ist, demonstrierten die Einzylindermotorversuche mit $\epsilon = 19,6$ und Mehrfacheinspritzung. Für beide Motoren stiegen die VOC-Rohemissionen mit erhöhtem Verdichtungsverhältnis. Mittels FTIR wurden die VOC-Emissionen genauer analysiert, wodurch eine Differenzierung zwischen unverbrannten und teilweise verbrannten Komponenten möglich war. Erstere stiegen um $\sim 130\%$, letztere um $\sim 60\%$. Die Ursache der erhöhten VOC-Emissionen war die starke Zerklüftung des Brennraums in Kombination mit einer gestörten Flammenausbreitung durch den Kolbenaufbau. Im Einsatz des $\epsilon = 19,6$ Prototypen-Kolben wurden trotz Mehrfacheinspritzung in den Hochlastpunkten PN-Emissionen von über 10^6 \#/cm^3 gemessen. Dies entsprach in etwa dem Benzin-Referenzniveau. Das $\epsilon = 15$ -Kolbendesign für die C65F35-Vierzylindermotorversuche wurde zusätzlich PN optimiert. Dadurch wurden die PN-Emissionen im Vergleich zum benzinbetriebenen Serienmotor um über 90% reduziert.

Sowohl C65F35 als auch Methanol zeigten am Einzylindermotor verschiedene charakteristische Vorteile: War der Wirkungsgrad das oberste Ziel, so war Methanol gegenüber C65F35 zu bevorzugen. Die brennverlaufsspezifischen Verluste waren für C65F35 im Vergleich zu Methanol erhöht. Für C65F35 sprach vor allem die Kaltstartperformance und die wegfallende PN10-Problematik.

7 Ausblick

In dieser Dissertation wurde untersucht, wie der Einsatz von MeOH und C65F35 in einem optimierten Verbrennungsmotor zu einem besseren Wirkungsgrad und zu einer Reduktion von Schadstoffemissionen führen kann. Das erhöhte Verdichtungsverhältnis und der Einsatz moderner Injektoren lieferte vielversprechende Ergebnisse. Es bedarf weiterer Forschung, um einen Motor zu entwickeln, der niedrigste Schadstoffemissionen in allen Betriebszuständen mit einem maximalen Wirkungsgrad kombiniert.

Für den Kaltstart mit Oxygenatkraftstoffen sollten kraftstoffangepassten TWC-Heizstrategien untersucht werden. Diese Steuerungsoptimierung könnte mit zusätzlichen Abgasreinigungssystemen kombiniert werden. Möglich wären beispielsweise eine Sekundärluftblasung, eine Integration eines beheizbaren Katalysators oder eines Kraftstoffheizers im Abgasstrang. Diese Maßnahmen zeigten in ersten Versuchen bereits hohe Schadstoffreduktionen im Kaltstart mit konventionellen [104, 106] und synthetischen Kraftstoffen [133, 241].

Die Erstellung eines methanolbasierten Winterkraftstoffs sollte weiter erforscht werden. Die Beimischung eines volatilen Bestandteils wie MeFo zu Methanol war in ersten Untersuchungen unter kalten Umgebungsbedingungen vielversprechend [45]. Wie für normkonforme Kraftstoffe könnte eine Additivierung die Motorperformance der C1-Oxygenatkraftstoffe unter Kaltstartbedingungen verbessern.

Für einen maximal effizienten Ottomotor, der auf dem EA888 basiert und ein Verdichtungsverhältnis von ~20 nutzt, bedarf es einer größeren Anpassung der gesamten Motorkonstruktion. Alleinige Modifikationen des Kolbens führten zu einer langsameren und unvollständigeren Verbrennung. Es muss erwogen werden, ob es angesichts der potenziellen weitreichenden Verwendung von hochklopfesten Oxygenatkraftstoffen sinnvoll ist, eine Neukonzeption des Motors in Betracht zu ziehen. Weltweit zeichnet sich jedoch im PKW-Segment ein starker Trend hin zur vollständigen Elektrifizierung des Antriebsstrangs ab [242]. Normkonforme, nachhaltige Kraftstoffe sollten dennoch eingeführt werden, um die THG-Emissionen des bestehenden Fahrzeugbestands zu reduzieren. Angesichts dessen ist fraglich, ob eine Neuentwicklung eines dedizierten C1-Oxygenatmotors im PKW-Segment derzeit von Automobilherstellern angestrebt wird.

Neben einem Einsatz in zukünftigen PKW, könnten die C1-Oxygenatkraftstoffe in anderen Anwendungsgebieten genutzt werden. Beispielsweise kann der Einsatz eines Methanolmotors in Portalhubwägen als sinnvolle Lösung betrachtet werden [243]. Portalhubwägen werden in Häfen eingesetzt und sind mit 100-150 kW Antriebsleistung durchaus vergleichbar mit dem Basismotor des Prüfstandes. Zukünftig dürfte dort auch die notwendige Kraftstoffinfrastruktur vorhanden sein, da der Einsatz von Methanol im Schiffsverkehr kurz- und mittelfristig sehr wahrscheinlich ist [244, 245]. Anders als im PKW-Segment haben europäische Motorenhersteller bereits heute Methanolmotoren und Umrüstungskits für Schiffsmotoren im Angebot [246, 247].

Die weitere Erforschung nachhaltiger Kraftstoffe für die Verwendung in Verbrennungsmotoren bleibt aktuell, da ihr Einsatz in verschiedensten Bereichen, Sektoren und Märkten immer noch alternativlos scheint.

Literaturverzeichnis

- [1] Horowitz, C.A., "Paris Agreement," *Int. leg. mater.* 55(4):740–755, 2016, doi:[10.1017/S0020782900004253](https://doi.org/10.1017/S0020782900004253).
- [2] IEA, "Cars and Vans," Paris, 2022, <https://www.iea.org/reports/cars-and-vans>, Zuletzt geprüft: 03.04.23.
- [3] Stan, C., "Alternative Antriebe für Automobile," Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-662-61757-1, 2020.
- [4] Schäfer, M., "VISION EQXX: Mission Efficiency," in: Geringer, B. and Lenz, H.P. (eds.), *Proceedings of the 43rd International Vienna Motor Symposium 27 - 29 April 2022*, Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK), Wien, ISBN 978-3-9504969-1-8, 2022.
- [5] Koroma, M.S., Costa, D., Philippot, M., Cardellini, G. et al., "Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management," *The Science of the total environment* 831:154859, 2022, doi:[10.1016/j.scitotenv.2022.154859](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154859).
- [6] Kucukvar, M., Onat, N.C., Kutty, A.A., Abdella, G.M. et al., "Environmental efficiency of electric vehicles in Europe under various electricity production mix scenarios," *Journal of cleaner production* 335:130291, 2022, doi:[10.1016/j.jclepro.2021.130291](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130291).
- [7] Kramer, U., Bothe, D., Gatzen, C., Pfannenschmidt, A. et al., "Future Fuels: FVV Fuels Study IVb: Project no. 1452-Final report," 2022.
- [8] Kramer, U., Bothe, D., Gatzen, C., Reger, M. et al., "Future Fuels: FVV Fuels Study IV: Transformation of Mobility to the GHG-neutral Post-fossil Age," Final report, Project number 1378, 2021.
- [9] European Commission, Directorate-General for Energy, "A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe," COM(2020) 301 final, Brussels, 2020.
- [10] METI Ministry of Economy, Trade and Industrie, "Basic Hydrogen Strategy (key points)," 2017, https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003a.pdf, Zuletzt geprüft: 15.09.20.
- [11] CleanEnergy.gov, "Building a clean energy economy: A guidebook to the inflation reduction act's investments in clean energy and climate action," Version 2, 2023.
- [12] Bevilacqua, V., Gallo, A., and Böger, M., "Hydrogen Combustion Engine – High Performance, No Emissions," in: Geringer, B. and Lenz, H.P. (eds.), *Proceedings of the 43rd International Vienna Motor Symposium 27 - 29 April 2022*, Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK), Wien, ISBN 978-3-9504969-1-8, 2022.

- [13] Fouquet, M., "Niedrigstemissionskonzept für einen wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor," Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2012, LVK Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Techn. Univ, München, ISBN 978-3-943813-02-9, 2012.
- [14] Verhelst, S., "Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines," *International Journal of Hydrogen Energy* 39(2):1071–1085, 2014, doi:[10.1016/j.ijhydene.2013.10.102](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.102).
- [15] Wang, M., Wang, G., Sun, Z., Zhang, Y. et al., "Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation," *Global Energy Interconnection* 2(5):436–443, 2019, doi:[10.1016/j.gloi.2019.11.019](https://doi.org/10.1016/j.gloi.2019.11.019).
- [16] Verhelst, S., Turner, J.W.G., Sileghem, L., and Vancoillie, J., "Methanol as a fuel for internal combustion engines," *Progress in Energy and Combustion Science* 70:43–88, 2019, doi:[10.1016/j.pecs.2018.10.001](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001).
- [17] Härtl, M., "Emissionsfreie Mobilität und Energiewende: Funktionelle E-Fuels," Habilitation, Technische Universität München, München, 2021.
- [18] Schemme, S., Breuer, J.L., Köller, M., Meschede, S. et al., "H₂-based synthetic fuels: A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production," *International Journal of Hydrogen Energy* 45(8):5395–5414, 2020, doi:[10.1016/j.ijhydene.2019.05.028](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.028).
- [19] Berger, M., Radu, D., Detienne, G., Deschuyteneer, T. et al., "Remote Renewable Hubs for Carbon-Neutral Synthetic Fuel Production," *Front. Energy Res.* 9, 2021, doi:[10.3389/fenrg.2021.671279](https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.671279).
- [20] i-deals Innovation & Technology Venturing Services, "Synthesis of methanol from captured carbon dioxide using surplus electricity: Horizon 2020," 2020, doi:[10.3030/637016](https://doi.org/10.3030/637016).
- [21] Siemens Energy, "Leuchtturmprojekt an der Südspitze Chiles: Produktionsstart in der weltweit ersten Großanlage für CO₂-neutralen Kraftstoff," München, 2022.
- [22] Zhejiang Geely Holding Group, "Geely Tests World's First Methanol Hybrid Sedan in -40C Proving Grounds: Geely Methanol Ecosystem," 2022, <http://zgh.com/media-center/news/2022-03-17/?lang=en>, Zuletzt geprüft: 11.12.23.
- [23] European Commission, "Delegierte Verordnung zur Ergänzung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates durch die Festlegung einer Unionsmethode mit detaillierten Vorschriften für die Erzeugung flüssiger oder gasförmiger erneuerbarer Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs für den Verkehr: C(2023) 1087 final," vol. 2023, 2023.
- [24] Block, T. and Neu, F., "What Policy Framework for Synthetic Fuels Exist in Europe and What Impact Do They Have?," in: *19th Symposium "Sustainable Mobility, Transport and Power Generation"*, TU Graz, ITnA, LEC, Graz, 2023.
- [25] Kulzer, A.C., Deeg, H.P., Villforth, J., Schwarzenthal, D. et al., "Sustainable Mobility Using Fuels with Pathways to Low Emissions," *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility* 2(4):1870–1892, 2020, doi:[10.4271/2020-01-0345](https://doi.org/10.4271/2020-01-0345).
- [26] Rüggeberg, M. and Grote, A., "Direct Air Capture - CO₂ from ambient air as a raw material for defossilized products: 2023-02-28 | Volkswagen Group Innovation, Sustainability Solutions," in: *10. International Engine Congress*, ATZlive; VDI Wissensforum, Baden-Baden, 2023.

- [27] Maus, W., "Zukünftige Kraftstoffe," Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-662-58005-9, 2019.
- [28] Maier, T., Härtl, M., Jacob, E., and Wachtmeister, G., "Dimethyl carbonate (DMC) and Methyl Formate (MeFo): Emission characteristics of novel, clean and potentially CO₂-neutral fuels including PMP and sub-23 nm nanoparticle-emission characteristics on a spark-ignition DI-engine," *Fuel* 256:115925, 2019, doi:[10.1016/j.fuel.2019.115925](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115925).
- [29] Härtl, M., Stadler, A., Backes, F., Wachtmeister, G. et al., "Potentially CO₂-neutral Fuels for Clean SI Engines," *MTZ Worldw* 78(7-8):76–83, 2017, doi:[10.1007/s38313-017-0058-1](https://doi.org/10.1007/s38313-017-0058-1).
- [30] van Vliet, O., van den Broek, M., Turkenburg, W., and Faaij, A., "Combining hybrid cars and synthetic fuels with electricity generation and carbon capture and storage," *Energy Policy* 39(1):248–268, 2011, doi:[10.1016/j.enpol.2010.09.038](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.038).
- [31] Lan, D., "Current Status of Research on Methanol as an Alternative Fuel to Conventional Fuels," *Trends in Renewable Energy*(9):22–33, 2023, doi:[10.17737/tre.2023.9.1.00147](https://doi.org/10.17737/tre.2023.9.1.00147).
- [32] Blochum, S., "Potentialbewertung von synthetischen, sauerstoffhaltigen C1-Kraftstoffen im direkteinspritzenden Ottomotor," Dissertation, Technische Universität München, München, 2022.
- [33] Bargende, M., Negüs, F., Kelich, V., Beidl, C. et al., "Potential of the methanol-powered SI engine in the hybrid powertrain: A simulative investigation," in: Liebl, J. (ed.), *Der Antrieb von morgen 2021*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-662-63402-8:87–103, 2021, doi:[10.1007/978-3-662-63403-5_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-63403-5_6).
- [34] Wouters, C., Burkardt, P., and Pischinger, S., "Limits of compression ratio in spark-ignition combustion with methanol," *International Journal of Engine Research* 23(5):793–803, 2022, doi:[10.1177/14680874211043390](https://doi.org/10.1177/14680874211043390).
- [35] Wouters, C., Burkardt, P., Steeger, F., Fleischmann, M. et al., "Comprehensive assessment of methanol as an alternative fuel for spark-ignition engines," *Fuel* 340:127627, 2023, doi:[10.1016/j.fuel.2023.127627](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127627).
- [36] Yoneya, N., Blochum, S., Wachtmeister, G., Yoshihito, Y. et al., "High Fuel Pressure and Multiple Injection of Gasoline for the Particle Emission Reduction Under Cold Conditions," in: *FISITA Web Congress 2020*, doi:[10.46720/f2020-epv-028](https://doi.org/10.46720/f2020-epv-028).
- [37] Duronio, F., Vita, A. de, Allocca, L., and Anatone, M., "Gasoline direct injection engines – A review of latest technologies and trends. Part 1: Spray breakup process," *Fuel* 265:116948, 2020, doi:[10.1016/j.fuel.2019.116948](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116948).
- [38] Duronio, F., Vita, A. de, Montanaro, A., and Villante, C., "Gasoline direct injection engines – A review of latest technologies and trends. Part 2," *Fuel* 265:116947, 2020, doi:[10.1016/j.fuel.2019.116947](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116947).
- [39] Lee, Z., Kim, T., Park, S., and Park, S., "Review on spray, combustion, and emission characteristics of recent developed direct-injection spark ignition (DISI) engine system with multi-hole type injector," *Fuel* 259:116209, 2020, doi:[10.1016/j.fuel.2019.116209](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116209).
- [40] Singh, R., Han, T., Fatouraie, M., Mansfield, A. et al., "Influence of fuel injection strategies on efficiency and particulate emissions of gasoline and ethanol blends in a turbocharged multi-cylinder direct injection engine," *International Journal of Engine Research* 22(1):152–164, 2021, doi:[10.1177/1468087419838393](https://doi.org/10.1177/1468087419838393).

- [41] Wooldridge, M.S., Singh, R., Gutierrez, L.G., and Clancy, S., "Survey of strategies to reduce cold-start particulate, CO, NOx, and hydrocarbon emissions from direct-injection spark-ignition engines," *International Journal of Engine Research*:146808742110685, 2022, doi:[10.1177/14680874211068576](https://doi.org/10.1177/14680874211068576).
- [42] Bäcker, H., "MEEMO - Methanol aus erneuerbarer Energie für Mobilität mit Plug-in-Hybridfahrzeugen - "Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe" : Schlussbericht : Laufzeit: 01.09.2018-31.05.2020," *MEEMO - Methanol aus erneuerbarer Energie für Mobilität mit Plug-in-Hybridfahrzeugen - "Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe"*, 2020, doi:[10.2314/KXP:1744579903](https://doi.org/10.2314/KXP:1744579903).
- [43] Blochum, S., Gadomski, B., Retzlaff, M., Thamm, F. et al., "Potential Analysis of a DMC/MeFo Mixture in a DISI Single and Multi-Cylinder Light Vehicle Gasoline Engine," SAE Technical Paper Series, SAE WCX Digital Summit, 2021, doi:[10.4271/2021-01-0561](https://doi.org/10.4271/2021-01-0561).
- [44] Wagner, C., Grill, M., Keskin, M.-T., Bargende, M. et al., "Potential Analysis and Virtual Development of SI Engines Operated with Synthetic Fuel DMC+," SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, 2020, doi:[10.4271/2020-01-0342](https://doi.org/10.4271/2020-01-0342).
- [45] Blochum, S., Fellner, Fellner, Mühlthaler, Markus, Härtl, M., Wachtmeister, G. et al., "Comparison of Promising Sustainable C1-Fuels Methanol, Dimethyl Carbonate, and Methyl Formate in a DISI Single Cylinder Light Vehicle Gasoline Engine," SAE Technical Paper Series, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Digital Summit, 2021, doi:[10.4271/2021-01-1204](https://doi.org/10.4271/2021-01-1204).
- [46] Leach, F., Kalghatgi, G., Stone, R., and Miles, P., "The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines," *Transportation Engineering* 1:100005, 2020, doi:[10.1016/j.treng.2020.100005](https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005).
- [47] Joshi, A., "Review of Vehicle Engine Efficiency and Emissions," *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility* 4(5):1704–1733, 2022, doi:[10.4271/2022-01-0540](https://doi.org/10.4271/2022-01-0540).
- [48] Joshi, A., "Review of Vehicle Engine Efficiency and Emissions," SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, 2020, doi:[10.4271/2020-01-0352](https://doi.org/10.4271/2020-01-0352).
- [49] Conway, G., Joshi, A., Leach, F., García, A. et al., "A review of current and future powertrain technologies and trends in 2020," *Transportation Engineering* 5:100080, 2021, doi:[10.1016/j.treng.2021.100080](https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100080).
- [50] Merker, G.P. and Teichmann, R., "Grundlagen Verbrennungsmotoren," Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-23556-7, 2019.
- [51] Stadler, A., "Wirkungsgrad- und Emissionspotential einer gespülten Benzin-Vorkammerzündung am PKW-Ottomotor," Dissertation, Technische Universität München, München, 2022.
- [52] Wagner, C., "Investigation on synthetic oxygenate fuels in future SI-engines using 0D/1D-simulation," Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2023.
- [53] Binder, J.P., "Bewertung von Maßnahmen zur Optimierung der Tribologie an Kolben und Zylinderlaufbahn im Kontext realer Betriebsbedingungen," Dissertation, Technische Universität München, München, 2022.

- [54] Szybist, J.P., Busch, S., McCormick, R.L., Pihl, J.A. et al., "What fuel properties enable higher thermal efficiency in spark-ignited engines?," *Progress in Energy and Combustion Science* 82:100876, 2021, doi:[10.1016/j.pecs.2020.100876](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100876).
- [55] Zhao, J., "Research and application of over-expansion cycle (Atkinson and Miller) engines – A review," *Applied Energy* 185:300–319, 2017, doi:[10.1016/j.apenergy.2016.10.063](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.063).
- [56] Wang, R., "GEELY's strategy and practice in powertrain electrification," in: *cti symposium*, Berlin, 2022.
- [57] Yang, D., Lu, G., Gong, Z., Qiu, A. et al., "Development of 43% Brake Thermal Efficiency Gasoline Engine for BYD DM-i Plug-in Hybrid," SAE Technical Paper Series, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Digital Summit, 2021, 2021, doi:[10.4271/2021-01-1241](https://doi.org/10.4271/2021-01-1241).
- [58] Furuhashi, T., "Development of Electric Powertrain for New CR-V Hybrid," in: *cti symposium*, Berlin, 2022.
- [59] Kasajima, Y., Egawa, T., Ushio, N., Kondo, T. et al., "Development of New 2.0L Inline 4-cylinder NA Engine for e:HEV," SAE Technical Paper Series, JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting, Kyoto, 2023, doi:[10.4271/2023-32-0074](https://doi.org/10.4271/2023-32-0074).
- [60] Kargul, J., Stuhldreher, M., Barba, D., Schenk, C. et al., "Benchmarking a 2018 Toyota Camry 2.5-liter Atkinson Cycle Engine with Cooled-EGR," *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility* 1(2):601–638, 2019, doi:[10.4271/2019-01-0249](https://doi.org/10.4271/2019-01-0249).
- [61] Kraus, C., Thamm, F., Retzlaff, M., Gadomski, B. et al., "Highly Efficient and Clean Combustion Engine for Synthetic Fuels," SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, Detroit, 2023, doi:[10.4271/2023-01-0223](https://doi.org/10.4271/2023-01-0223).
- [62] Wetzel, M., Karl, M., Sailer, T., and Schmid, H., "Die weiterentwickelte Efficient-Dynamics-Motorenfamilie," *MTZ Motortech Z* 84(6):16–23, 2023, doi:[10.1007/s35146-023-1466-1](https://doi.org/10.1007/s35146-023-1466-1).
- [63] Marriott, C.D., Predoehl, A., Stahl, I., and Velosa, J., "The New 1.5L Turbo Engine from General Motors," 2022-46, in: *Vienna Motor Symposium 2022: 27.04-29.04.2022*.
- [64] Wada, Y., Nakano, K., Mochizuki, K., and Hata, R., "Development of a New 1.5L I4 Turbocharged Gasoline Direct Injection Engine," SAE Technical Paper Series, SAE 2016 World Congress and Exhibition, 2016, doi:[10.4271/2016-01-1020](https://doi.org/10.4271/2016-01-1020).
- [65] Dernet, J., Najt, P.M., and Durrett, R.P., "Downsized-Boosted Gasoline Engine with Exhaust Compound and Dilute Advanced Combustion," SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, 2020, doi:[10.4271/2020-01-0795](https://doi.org/10.4271/2020-01-0795).
- [66] Zhao, J., Fu, R., Wang, S., Xu, H. et al., "Fuel economy improvement of a turbocharged gasoline SI engine through combining cooled EGR and high compression ratio," *Energy* 239:122353, 2022, doi:[10.1016/j.energy.2021.122353](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122353).
- [67] Leroy, T., Nowak, L., Gautrot, X., Alvarado, M. et al., "SWUMBLE 3-Cylinder High Efficiency Gasoline Engine for Future Electrified Powertrains," in: *42nd International Vienna Motor Symposium 2021*.
- [68] Cooper, A., Harrington, A., Bassett, M., Pates, D. et al., "Passive MAHLE Jet Ignition: The Capability for Whole Area," 2020.
- [69] Hong, H., Parvate-Patil, G.B., and Gordon, B., "Review and analysis of variable valve timing strategies—eight ways to approach," *Proceedings of the Institution of Mechanical*

- Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 218(10):1179–1200, 2004, doi:[10.1177/095440700421801013](https://doi.org/10.1177/095440700421801013).
- [70] Lou, Z. and Zhu, G., “Review of Advancement in Variable Valve Actuation of Internal Combustion Engines,” *Applied Sciences* 10(4):1216, 2020, doi:[10.3390/app10041216](https://doi.org/10.3390/app10041216).
- [71] Binder, J., Kreckler, O., Kraus, C., Jaensch, M. et al., “Analysis of the Piston Group Friction in a Single-Cylinder Gasoline Engine When Operated with Synthetic Fuel DMC/MeFo,” SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, 2022, doi:[10.4271/2022-01-0485](https://doi.org/10.4271/2022-01-0485).
- [72] Takano, K., Iino, S., Yamamoto, K., and Moriizumi, Y., “The Fuel Economy Improvement Effect of MoDTC with Low Viscosity Engine Oil under Hybrid Electric Vehicle,” SAE Technical Paper Series, JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting, Kyoto, 2023, doi:[10.4271/2023-32-0112](https://doi.org/10.4271/2023-32-0112).
- [73] Arnold, T., Böhme, J., Krause, M., Leesch, M. et al., “Low friction and on-demand thermal management for a high-efficiency internal combustion engine in a net zero CO₂ hybrid powertrain,” SAE Technical Paper Series, JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting, Kyoto, 2023, doi:[10.4271/2023-32-0134](https://doi.org/10.4271/2023-32-0134).
- [74] Serrano, D., Zaccardi, J.-M., Müller, C., Libert, C. et al., “Ultra-Lean Pre-Chamber Gasoline Engine for Future Hybrid Powertrains,” SAE Technical Paper Series, 14th International Conference on Engines & Vehicles, 2019, doi:[10.4271/2019-24-0104](https://doi.org/10.4271/2019-24-0104).
- [75] Alvarez, C.E.C., Couto, G.E., Roso, V.R., Thiriet, A.B. et al., “A review of prechamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines,” *Applied Thermal Engineering* 128:107–120, 2018, doi:[10.1016/j.applthermaleng.2017.08.118](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.118).
- [76] World Health Organization and WHO European Centre for Environment and Health, “WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,” WHO European Centre for Environment and Health, Bonn, Germany, ISBN 9789240034228, 2021.
- [77] European Commission, “Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009: COM(2022) 586 final 2022/0365 (COD),” 2022.
- [78] European Commission, “Annexes to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009,” 2022.
- [79] Franco, V., Dilara, P., Hennig, N., Manara, D. et al., “On-Board Monitoring of Emissions in the Future Euro 7 Standard,” SAE Technical Paper Series, 16th International Conference on Engines & Vehicles, Capri, 2023, doi:[10.4271/2023-24-0111](https://doi.org/10.4271/2023-24-0111).
- [80] Kondo, Y., Hamauchi, S., Kowada, Y., Shibuya, K. et al., “Development Of On-board Multi-component Gas Analyzer Toward Euro 7,” SAE Technical Paper Series, JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting, Kyoto, 2023, doi:[10.4271/2023-32-0026](https://doi.org/10.4271/2023-32-0026).

- [81] Clove Consortium, LAT, emisia, FEV et al., "Study on post EURO 6/VI emission standards in Europe: Progress in Task 2.2: Development of new array of tests," Presentation to the Advisory Group on Vehicle Emission Standards, 2019.
- [82] Clove Consortium, Zissis Samaras, and Hausberger, S., "Preliminary findings on possible Euro 7 emission limits for LD and HD vehicles: Online AGVES Meeting," 2020.
- [83] Rat der Europäischen Union, "COUNCIL DIRECTIVE 1999/13/EC on the limitation of emissions of volatile organic compounds due to the use of organic solvents in certain activities and installations: 1999/13/EC," 1999.
- [84] Schuetzle, D., Siegl, W.O., Jensen, T.E., Dearth, M.A. et al., "The relationship between gasoline composition and vehicle hydrocarbon emissions: a review of current studies and future research needs," *Environmental health perspectives* 102 Suppl 4(Suppl 4):3–12, 1994, doi:[10.1289/ehp.94102s43](https://doi.org/10.1289/ehp.94102s43).
- [85] Mar, K.A., Unger, C., Walderdorff, L., and Butler, T., "Beyond CO2 equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health," *Environmental Science & Policy* 134:127–136, 2022, doi:[10.1016/j.envsci.2022.03.027](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.027).
- [86] Wagner, T. and Wyszynski, M.L., "Aldehydes and Ketones in Engine Exhaust Emissions— a Review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 210(2):109–122, 1996, doi:[10.1243/PIME_PROC_1996_210_252_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1996_210_252_02).
- [87] Suarez-Bertoa, R., Pechout, M., Vojtišek, M., and Astorga, C., "Regulated and Non-Regulated Emissions from Euro 6 Diesel, Gasoline and CNG Vehicles under Real-World Driving Conditions," *Atmosphere* 11(2):204, 2020, doi:[10.3390/atmos11020204](https://doi.org/10.3390/atmos11020204).
- [88] Backes, F., "Experimentelle Untersuchungen zu Partikelanzahlemissionen beim direkteinspritzenden Ottomotor," Dissertation, Technische Universität München, München, 2021.
- [89] Giechaskiel, B., Joshi, A., Ntziachristos, L., and Dilara, P., "European Regulatory Framework and Particulate Matter Emissions of Gasoline Light-Duty Vehicles: A Review," *Catalysts* 9(7):586, 2019, doi:[10.3390/catal9070586](https://doi.org/10.3390/catal9070586).
- [90] Giechaskiel, B., Maricq, M., Ntziachristos, L., Dardiotis, C. et al., "Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number," *Journal of Aerosol Science* 67:48–86, 2014, doi:[10.1016/j.jaerosci.2013.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.09.003).
- [91] Hoekman, S.k., "Review of Nitrous Oxide (N2O) Emissions from Motor Vehicles," in: *SAE International Journal of Fuels*, vol. 13, 2020, doi:[10.4271/04-13-01-0005](https://doi.org/10.4271/04-13-01-0005).
- [92] Suarez-Bertoa, R. and Astorga, C., "Isocyanic acid and ammonia in vehicle emissions," *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 49:259–270, 2016, doi:[10.1016/j.trd.2016.08.039](https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.039).
- [93] Suarez-Bertoa, R., Zardini, A.A., and Astorga, C., "Ammonia exhaust emissions from spark ignition vehicles over the New European Driving Cycle," *Atmospheric Environment* 97:43–53, 2014, doi:[10.1016/j.atmosenv.2014.07.050](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.050).
- [94] Fenimore, C.P., "Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames," *Symposium (International) on Combustion* 13(1):373–380, 1971, doi:[10.1016/S0082-0784\(71\)80040-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80040-1).
- [95] Lavoie, G.A., Heywood, J.B., and Keck, J.C., "Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines," *Combustion Science and Technology* 1(4):313–326, 1970, doi:[10.1080/00102206908952211](https://doi.org/10.1080/00102206908952211).

- [96] Brinklow, G., Herreros, J.M., Zeraati Rezaei, S., Doustdar, O. et al., "Non-carbon greenhouse gas emissions for hybrid electric vehicles: three-way catalyst nitrous oxide and ammonia trade-off," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2023, doi:[10.1007/s13762-023-04848-2](https://doi.org/10.1007/s13762-023-04848-2).
- [97] Zhang, M., Ge, Y., Wang, X., Xu, H. et al., "Effects of ethanol and aromatic compositions on regulated and unregulated emissions of E10-fuelled China-6 compliant gasoline direct injection vehicles," *Renewable Energy* 176:322–333, 2021, doi:[10.1016/j.renene.2021.03.029](https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.029).
- [98] Suarez-Bertoa, R., Clairotte, M., Arlitt, B., Nakatani, S. et al., "Intercomparison of ethanol, formaldehyde and acetaldehyde measurements from a flex-fuel vehicle exhaust during the WLTC," *Fuel* 203:330–340, 2017, doi:[10.1016/j.fuel.2017.04.131](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.131).
- [99] Awad, O.I., Ma, X., Kamil, M., Ali, O.M. et al., "Particulate emissions from gasoline direct injection engines: A review of how current emission regulations are being met by automobile manufacturers," *The Science of the total environment* 718:137302, 2020, doi:[10.1016/j.scitotenv.2020.137302](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137302).
- [100] Boger, T., Rose, D., He, S., and Joshi, A., "Developments for future EU7 regulations and the path to zero impact emissions – A catalyst substrate and filter supplier's perspective," *Transportation Engineering* 10:100129, 2022, doi:[10.1016/j.treng.2022.100129](https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100129).
- [101] Nishioka, H., Kobayashi, H., Fujiwara, T., Sugiura, K. et al., "Improvement of PN Filtration Efficiency of Coated GPF– Study of Improvement of PN Filtration Efficiency and Reduction of Pressure Drop," SAE Technical Paper Series, JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting, Kyoto, 2023, doi:[10.4271/2023-32-0124](https://doi.org/10.4271/2023-32-0124).
- [102] Coulet, B., Rose, D., Boger, T., and Glasson, T., "Ottomotoren mit Partikelfilter Erfahrungen zur Ascheeinlagerung und Auswirkungen auf die Filtereigenschaften," *MTZ Motortech Z* 80(1):46–51, 2019, doi:[10.1007/s35146-018-0137-0](https://doi.org/10.1007/s35146-018-0137-0).
- [103] Valverde Morales, V., "Exhaust Emissions of In-Use Euro 6d-TEMP and Euro 6d Vehicles in WLTP and RDE Conditions, a Comparison," SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Conference & Exhibition, 2022, doi:[10.4271/2022-01-1023](https://doi.org/10.4271/2022-01-1023).
- [104] Maurer, R., Kossioris, T., Sterlepper, S., Günther, M. et al., "Achieving Zero-Impact Emissions with a Gasoline Passenger Car," *Atmosphere* 14(2):313, 2023, doi:[10.3390/atmos14020313](https://doi.org/10.3390/atmos14020313).
- [105] van Basshuysen, R. and Schäfer, F., "Handbuch Verbrennungsmotor," Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-04677-4, 2015.
- [106] Hassdenteufel, A., Schünemann, E., Neubert, V., and Hirchenhein, A., "Gasoline powertrain solutions with ultra low tailpipe emissions," *Transportation Engineering* 8:100109, 2022, doi:[10.1016/j.treng.2022.100109](https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100109).
- [107] Suarez-Bertoa, R. and Astorga, C., "Impact of cold temperature on Euro 6 passenger car emissions," *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 234:318–329, 2018, doi:[10.1016/j.envpol.2017.10.096](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.096).
- [108] Wen, Y., Zhang, S., He, L., Yang, S. et al., "Characterizing start emissions of gasoline vehicles and the seasonal, diurnal and spatial variabilities in China," *Atmospheric Environment* 245:118040, 2021, doi:[10.1016/j.atmosenv.2020.118040](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118040).

- [109] Gao, J., Tian, G., Sorniotti, A., Karci, A.E. et al., "Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up," *Applied Thermal Engineering* 147:177–187, 2019, doi:[10.1016/j.applthermaleng.2018.10.037](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.037).
- [110] Fellner, F., Miyamoto, A., Joerg, C., Kraus, C. et al., "Applications of an Advanced Multiple Injection Calibration Strategy to Address Future Emission Legislation Challenges," 16th International Conference on Engines & Vehicles, Naples, 2023, doi:[10.4271/2023-24-0081](https://doi.org/10.4271/2023-24-0081).
- [111] Yadla, S.K., Terber, D., Keuler, J., and Davies, P., "Elektrifizierte Aufladung für erweiterten Sekundärluftbetrieb," *MTZ Motortech Z* 84(5):70–75, 2023, doi:[10.1007/s35146-023-1464-3](https://doi.org/10.1007/s35146-023-1464-3).
- [112] Demuynck, J., Mendoza Villafuerte, P., Bosteels, D., Kuhrt, A. et al., "Advanced Emission Controls and E-fuels on a Gasoline Car for Zero-Impact Emissions," SAE Technical Paper Series, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Conference & Exhibition, 2022, doi:[10.4271/2022-01-1014](https://doi.org/10.4271/2022-01-1014).
- [113] Franzke, B., Adomeit, P., Hoppe, F., and Morcinkowski, B., "Lambda = 1 im gesamten Motorkennfeld," in: Liebl, J. (ed.), *Ladungswechsel und Emissionierung 2018*, Proceedings, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-24983-0:50–72, 2019, doi:[10.1007/978-3-658-24984-7_3](https://doi.org/10.1007/978-3-658-24984-7_3).
- [114] Bennewitz, K., Willmann, S., Mühlmann, J., and Hoffmeyer, H., "Ready for Future – Volkswagen's New TSI-Engine Generation," in: Geringer, B. and Lenz, H.P. (eds.), *Proceedings of the 43rd International Vienna Motor Symposium 27 - 29 April 2022*, Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK), Wien, ISBN 978-3-9504969-1-8, 2022.
- [115] Brenneisen, C., Riemann, S., and Kersten, R., "Optimierung der Gemischbildung und Abgasnachbehandlung am Ottomotor EA888 R4 2,0l TFSI," in: Liebl, J. (ed.), *Experten-Forum Powertrain: Ladungswechsel und Emissionierung 2020*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-662-63523-0:117–129, 2021, doi:[10.1007/978-3-662-63524-7_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-63524-7_7).
- [116] Imaoka, Y., Shouji, K., Inoue, T., and Noda, T., "A Study of a Multistage Injection Mechanism for Improving the Combustion of Direct-Injection Gasoline Engines," *SAE Int. J. Engines* 8(3):1080–1087, 2015, doi:[10.4271/2015-01-0883](https://doi.org/10.4271/2015-01-0883).
- [117] Han, T., Singh, R., Lavoie, G., Wooldridge, M. et al., "Multiple injection for improving knock, gaseous and particulate matter emissions in direct injection SI engines," *Applied Energy* 262:114578, 2020, doi:[10.1016/j.apenergy.2020.114578](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114578).
- [118] Kawawa, S., Tomitani, Y., Nakashima, H., Imakita, A. et al., "Development of New 3.5 L V6 Gasoline Direct Injection Engine," SAE Technical Paper Series, JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting, Kyoto, 2023, doi:[10.4271/2023-32-0073](https://doi.org/10.4271/2023-32-0073).
- [119] Jörg, C., Yasukawa, Y., Kleinmann, A., Miyamoto, A. et al., "Model-Based Gasoline Direct-Injection Control for Robust Emission Reduction," in: Geringer, B. and Lenz, H.P. (eds.), *Proceedings of the 43rd International Vienna Motor Symposium 27 - 29 April 2022*, Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK), Wien, ISBN 978-3-9504969-1-8, 2022.

- [120] Fellner, F., Fitz, P., Kraus, C., Joerg, C. et al., "Algorithm-Calculated Multiple Injection Patterns to Meet Future Requirements to Direct-Injection Spark Ignited Engines," SAE Technical Paper Series, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Conference & Exhibition, 2022, doi:[10.4271/2022-01-1068](https://doi.org/10.4271/2022-01-1068).
- [121] Kraus, C., Härtl, M., and Jaensch, M., "Sustainable mobility through synthetic fuels: Spark ignition engines: Postersession," in: *9th International Engine Congress*, ATZlive; VDI Wissensforum, Baden-Baden, 2022.
- [122] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., "Kraftstoffe – Unverbleite Ottokraftstoffe – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 228:2012+A1:2017," 228, Rev. Aug. 2017.
- [123] Ferrari, A., Vrtiska, D., Poilka, M., Schmidt, M. et al., "Advances in Fossil-Free Motorsports Fuels for Sustainable Transportation," 2023.
- [124] Siemens, A.P., "Transformation of passenger car mobility: Contribution of the existing fleet to the Paris Agreement," AUDI AG I/EM, in: *10. International Engine Congress*, ATZlive; VDI Wissensforum, Baden-Baden, 2023.
- [125] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., "Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren–Alkylatkraftstoff für Kleinmotoren–Anforderungen und Prüfverfahren," DIN51641, Rev. Sep. 2020.
- [126] David C. Finger, Ulrich Schäffeler, and Mario Keller, "Einsatzfelder und Nutzen des Alkylatbenzins - ein Lagebericht," 2008, doi:[10.13140/RG.2.2.24058.44487](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24058.44487).
- [127] Krämer, H., Send, M., Gessner, M., Storch, M. et al., "Drop-In Renewable Gasoline Fuels for CO2 Reduction: Evaluation and Demonstration of Functional Potentials," in: *9th International Engine Congress*, ATZlive; VDI Wissensforum, Baden-Baden, 2022.
- [128] Bertsch, M., Koch, T., Velji, A., and Kubach, H., "Thermodynamic and Optical Investigations on Particle Emissions in a DISI Engine at Boosted Operation," *SAE Int. J. Engines* 9(1):154–170, 2016, doi:[10.4271/2015-01-1888](https://doi.org/10.4271/2015-01-1888).
- [129] Dimitrakopoulos, N. and Tunér, M., "Evaluation of engine efficiency, emissions and load range of a PPC concept engine, with higher octane and alkylate gasoline," *Fuel* 275:117955, 2020, doi:[10.1016/j.fuel.2020.117955](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117955).
- [130] Ershov, M., Potanin, D., Guseva, A., Abdellatif, T.M.M. et al., "Novel strategy to develop the technology of high-octane alternative fuel based on low-octane gasoline Fischer-Tropsch process," *Fuel* 261:116330, 2020, doi:[10.1016/j.fuel.2019.116330](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116330).
- [131] Härtl, M., Kraus, C., and Jaensch, M., "Electrification and E-Fuels – The Future of Otto- and Diesel-Engines," in: Geringer, B. and Lenz, H.P. (eds.), *Proceedings of the 43rd International Vienna Motor Symposium 27 - 29 April 2022*, Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK), Wien, ISBN 978-3-9504969-1-8, 2022.
- [132] Kraus, C., Fitz, P., Fellner, F., Härtl, M. et al., "Exhaust Gas Analysis of Various Potential GHG-Neutral Synthetic Fuels and Gasoline/Alkylate-Blends Including Variable Injection Timings," SAE Technical Paper Series, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Conference & Exhibition, 2022, doi:[10.4271/2022-01-1085](https://doi.org/10.4271/2022-01-1085).
- [133] Villforth, J., Kulzer, A.C., Weißhaar, A., Deeg, H.-P. et al., "The Influence of eFuel Formulation on Post Oxidation and Cold Start Emissions," SAE Technical Paper Series, SAE WCX Digital Summit, 2021, doi:[10.4271/2021-01-0632](https://doi.org/10.4271/2021-01-0632).

- [134] Heuser, B., Otting, J., Schnorbus, T., and Mütter, M., "Closed Carbon Cycle Mobility – Evaluation of Synthetic Fuels Based on Methanol from Renewable Sources," in: *9th International Engine Congress*, ATZlive; VDI Wissensforum, Baden-Baden, 2022.
- [135] Rockstroh, T., Floweday, G., and Yates, A., "Optimization of synthetic gasoline blend recipes for use in modern charge boosted GDI engines," *Fuel* 186:800–820, 2016, doi:[10.1016/j.fuel.2016.09.001](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.001).
- [136] Wouters, C., Lehrheuer, B., Pischinger, S., Seifert, P. et al., "Evaluation of Synthetic Gasoline Fuels and Alcohol Blends in a Spark-Ignition Engine," *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 15(3), 2022, doi:[10.4271/04-15-03-0017](https://doi.org/10.4271/04-15-03-0017).
- [137] Albrecht, M., Deeg, H.-P., Schwarzenenthal, D., and Eilts, P., "Investigations of the Emissions of Fuels with different Compositions and Renewable Fuel Components in a GDI Engine," SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, 2020, doi:[10.4271/2020-01-0285](https://doi.org/10.4271/2020-01-0285).
- [138] Albrecht, M., Deeg, H.-P., Schwarzenenthal, D., and Eilts, P., "The Influence of Fuel Composition and Renewable Fuel Components on the Emissions of a GDI Engine," SAE Technical Paper Series, CO2 Reduction for Transportation Systems Conference, 2020, doi:[10.4271/2020-37-0025](https://doi.org/10.4271/2020-37-0025).
- [139] Yates, T., Ali, R., Suzuki, M., Matsubara, N. et al., "Evaluation of Fully Sustainable Low Carbon Gasoline Fuels Meeting Japanese E10 Regular and Premium Octane Specifications," SAE Technical Paper Series, JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting, Kyoto, 2023, doi:[10.4271/2023-32-0165](https://doi.org/10.4271/2023-32-0165).
- [140] Albrecht, M., "Einflüsse der Kraftstoffzusammensetzung sowie erneuerbarer Kraftstoffkomponenten auf die Verbrennung und Emissionen eines Ottomotors," Dissertation, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2020.
- [141] Chijiwa, R., Rose, D., Boger, T., Krueger-Venus, J. et al., "Impact from a variety of E10 and E20 gasoline formulations on PN10 and PN23 emissions evaluated in combination with advanced GPF technology generations," SAE Technical Paper Series, JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting, Kyoto, 2023, doi:[10.4271/2023-32-0028](https://doi.org/10.4271/2023-32-0028).
- [142] Köhler, M., Kuschel, M., Schmidt, S., and Raabe, T., "Closed Carbon Cycle - Mobility: Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft - C³-Mobility; Modul I: Produktionspfade klimaneutraler Kraftstoffe : Schlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018-30.11.2021," *Closed Carbon Cycle - Mobility: Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft - C³-Mobility; Modul I: Produktionspfade klimaneutraler Kraftstoffe*, doi:[10.2314/KXP:1854199277](https://doi.org/10.2314/KXP:1854199277).
- [143] Kajaste, R., Hurme, M., and Oinas, P., "Methanol-Managing greenhouse gas emissions in the production chain by optimizing the resource base," *AIMS Energy* 6(6):1074–1102, 2018, doi:[10.3934/energy.2018.6.1074](https://doi.org/10.3934/energy.2018.6.1074).
- [144] Kass, M.D., Theiss, T., Pawel, S., Baustian, J. et al., "Compatibility Assessment of Elastomer Materials to Test Fuels Representing Gasoline Blends Containing Ethanol and Isobutanol," *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 7(2):445–456, 2014, doi:[10.4271/2014-01-1462](https://doi.org/10.4271/2014-01-1462).
- [145] Nidhi, N. and Subramanian, K.A., "Study on Effects of Methanol on Material Compatibility of a Fuel Supply System in a Spark Ignition Engine," SAE Technical Paper Series, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Digital Summit, 2021, doi:[10.4271/2021-01-1189](https://doi.org/10.4271/2021-01-1189).

- [146] Li, C., Jia, T., Wang, S., Wang, X. et al., "Methanol Vehicles in China: A Review from a Policy Perspective," *Sustainability* 15(12):9201, 2023, doi:[10.3390/su15129201](https://doi.org/10.3390/su15129201).
- [147] Abdellatif, T.M.M., Ershov, M.A., Kapustin, V.M., Ali Abdelkareem, M. et al., "Recent trends for introducing promising fuel components to enhance the anti-knock quality of gasoline: A systematic review," *Fuel* 291:120112, 2021, doi:[10.1016/j.fuel.2020.120112](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120112).
- [148] Kraus, C., Fellner, F., Miyamoto, A., Sauerland, H. et al., "Injector Design and Fuel Pressure Variation for Oxygenated Spark Ignition Fuels," SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, Detroit, 2023, doi:[10.4271/2023-01-0306](https://doi.org/10.4271/2023-01-0306).
- [149] Blochum, S., Ruch, F.H., Bastuck, T., Härtl, M. et al., "Identification of In-Cylinder Aerosol Flow Induced Emissions due to Piston Ring Design in a DISI Single Cylinder LV Engine Using Oxygenated Synthetic Fuels," SAE Technical Paper Series, SAE WCX Digital Summit, 2021, doi:[10.4271/2021-01-0625](https://doi.org/10.4271/2021-01-0625).
- [150] Birmili, W., Heinke, K., Pitz, M., Matschullat, J. et al., "Particle number size distributions in urban air before and after volatilisation," *Atmos. Chem. Phys.* 10(10):4643–4660, 2010, doi:[10.5194/acp-10-4643-2010](https://doi.org/10.5194/acp-10-4643-2010).
- [151] Ainouz, F., Adlercreutz, L., Cronhjort, A., and Stenlaas, O., "Correlation of Oil Originating Particle Emissions and Knock in a PFI HD SI Engine Fueled with Methanol," SAE Technical Paper Series, 16th International Conference on Engines & Vehicles, Capri, 2023, doi:[10.4271/2023-24-0036](https://doi.org/10.4271/2023-24-0036).
- [152] Amirante, R., Distaso, E., Di Iorio, S., Pettinicchio, D. et al., "Experimental Investigations on the Sources of Particulate Emission within a Natural Gas Spark-Ignition Engine," SAE Technical Paper Series, 13th International Conference on Engines & Vehicles, 2017, doi:[10.4271/2017-24-0141](https://doi.org/10.4271/2017-24-0141).
- [153] Stark, M., Preuss, A.-C., Pryymak, K., Azetsu, A. et al., "Fuel Oil Flow Measurement FVV Nr. 1396 | Abschlussbericht (AB)," Heft R603 (2022), 2022.
- [154] Böhmeke, C., Heinz, L., and Wagner, U., "Fuel Influence on Particulate Characteristics: Influence of oil and fuel components on soot formation in gasoline engines," FVV Vorhaben Nr. 1374 final report, 2023.
- [155] Catapano, F., Di Iorio, S., Magno, A., Sementa, P. et al., "A Comparison of Methanol, Methane and Hydrogen Fuels for SI Engines: Performance and Pollutant Emissions," SAE Technical Paper Series, 16th International Conference on Engines & Vehicles, Capri, 2023, doi:[10.4271/2023-24-0037](https://doi.org/10.4271/2023-24-0037).
- [156] Harrington, A., Hall, J., Bassett, M., Lu, E. et al., "Combustion Characteristics and Exhaust Emissions of a Direct Injection SI Engine with Pure Ethanol and Methanol in Comparison to Gasoline," SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Conference & Exhibition, 2022, doi:[10.4271/2022-01-1089](https://doi.org/10.4271/2022-01-1089).
- [157] Wen, Y., Wang, Y., Fu, C., Deng, W. et al., "The Impact of Injector Deposits on Spray and Particulate Emission of Advanced Gasoline Direct Injection Vehicle," SAE Technical Paper Series, SAE 2016 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting, 2016, doi:[10.4271/2016-01-2284](https://doi.org/10.4271/2016-01-2284).
- [158] Wyszynski, L.P., Stone, C.R., and Kalghatgi, G.T., "The Volumetric Efficiency of Direct and Port Injection Gasoline Engines with Different Fuels," SAE Technical Paper Series, SAE 2002 World Congress & Exhibition, 2002, doi:[10.4271/2002-01-0839](https://doi.org/10.4271/2002-01-0839).

- [159] Ho, C.S., Peng, J., Yun, U., Zhang, Q. et al., "Impacts of methanol fuel on vehicular emissions: A review," *Front. Environ. Sci. Eng.* 16(9), 2022, doi:[10.1007/s11783-022-1553-4](https://doi.org/10.1007/s11783-022-1553-4).
- [160] Wang, X., Ge, Y., Liu, L., and Gong, H., "Regulated, Carbonyl Emissions and Particulate Matter from a Dual-Fuel Passenger Car Burning Neat Methanol and Gasoline," SAE Technical Paper Series, SAE 2015 World Congress & Exhibition, 2015, doi:[10.4271/2015-01-1082](https://doi.org/10.4271/2015-01-1082).
- [161] Kraus, C., Fellner, F., Härtl, M., Blochum, S. et al., "Review of Potential CO₂-Neutral Fuels in Passenger Cars in Context of a Possible Future Hybrid Powertrain," SAE Technical Paper Series, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Digital Summit, 2021, doi:[10.4271/2021-01-1229](https://doi.org/10.4271/2021-01-1229).
- [162] Wallner, T., "Correlation Between Speciated Hydrocarbon Emissions and Flame Ionization Detector Response for Gasoline/Alcohol Blends," *ASME 2010 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, ASME 2010 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, San Antonio, Texas, USA, 12.09.2010 - 15.09.2010, 09122010, doi:[10.1115/ICEF2010-35031](https://doi.org/10.1115/ICEF2010-35031), ASMEDC, ISBN 978-0-7918-4944-6:119–128.
- [163] Schillinger, M., "Messtechnik und Vollmotor: Responsefaktoren bei FID," in: *Namosyn Cluster FC2- Abschlusskonferenz 23.05.2022*.
- [164] Wei, Y., Liu, S., Liu, F., Liu, J. et al., "Formaldehyde and Methanol Emissions from a Methanol/Gasoline-Fueled Spark-Ignition (SI) Engine," *Energy Fuels* 23(6):3313–3318, 2009, doi:[10.1021/ef900175h](https://doi.org/10.1021/ef900175h).
- [165] Giechaskiel, B. and Clairotte, M., "Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy for Measurements of Vehicle Exhaust Emissions: A Review," *Applied Sciences* 11(16):7416, 2021, doi:[10.3390/app11167416](https://doi.org/10.3390/app11167416).
- [166] Giechaskiel, B., Jakobsson, T., Karlsson, H.L., Khan, M.Y. et al., "Assessment of On-Board and Laboratory Gas Measurement Systems for Future Heavy-Duty Emissions Regulations," *International journal of environmental research and public health* 19(10), 2022, doi:[10.3390/ijerph19106199](https://doi.org/10.3390/ijerph19106199).
- [167] Engelmann, D., Zimmerli, Y., Ruoss, F., and Frank, E., "Real Driving Emissions of Diesel and LNG Euro VI Heavy-Duty Vehicles Measured with FTIR-PEMS," SAE Technical Paper Series, 15th International Conference on Engines & Vehicles, 2021, doi:[10.4271/2021-24-0066](https://doi.org/10.4271/2021-24-0066).
- [168] Jakubec, P., "Assessment of an On-Board FT-IR Gas Measurement Systems for Future Heavy-Duty Regulations," in: UC Riverside, Center for Environmental Research & Technology (ed.), *2023 OSAR Conference*, Riverside, 2023.
- [169] Andersson, J., Giechaskiel, B., Munoz-Bueno, R., Sandbach, E. et al., "Particle Measurement Programme (PMP) Light-duty Inter-laboratory Correlation Exercise (ILCE_LD) Final Report," EUR 22775 EN, 2007.
- [170] United Nations, "Regulation No. 83-Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants according to engine fuel requirements," 2015.
- [171] Giechaskiel, B., Melas, A.D., Lähde, T., and Martini, G., "Non-Volatile Particle Number Emission Measurements with Catalytic Strippers: A Review," *Vehicles* 2(2):342–364, 2020, doi:[10.3390/vehicles2020019](https://doi.org/10.3390/vehicles2020019).

- [172] Swanson, J. and Kittelson, D., "Evaluation of thermal denuder and catalytic stripper methods for solid particle measurements," *Journal of Aerosol Science* 41(12):1113–1122, 2010, doi:[10.1016/j.jaerosci.2010.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.09.003).
- [173] Gelner, A.D., Rothe, D., Kykal, C., Irwin, M. et al., "Particle emissions of a heavy-duty engine fueled with polyoxymethylene dimethyl ethers (OME)," *Environ. Sci.: Atmos.* 2(2):291–304, 2022, doi:[10.1039/D1EA00084E](https://doi.org/10.1039/D1EA00084E).
- [174] Michler, T., Dörnhöfer, J., Erforth, D., Heinz, A. et al., "Comparison of Different Particle Measurement Techniques at a Heavy-Duty Diesel Engine Test Bed," SAE Technical Paper Series, 14th International Conference on Engines & Vehicles, 2019, doi:[10.4271/2019-24-0158](https://doi.org/10.4271/2019-24-0158).
- [175] IFKM des Karlsruher Instituts für Technologie, "Verbundprojekt MEEMO - Methanol aus erneuerbarer Energie für Mobilität mit Plug-in-Hybridfahrzeugen : im Rahmen der BMWi-Förderinitiative "Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe" : Abschlussbericht," 2021, doi:[10.2314/KXP:186050387X](https://doi.org/10.2314/KXP:186050387X).
- [176] Brusstar, M., Stuhldreher, M., Swain, D., and Pidgeon, W., "High Efficiency and Low Emissions from a Port-Injected Engine with Neat Alcohol Fuels," SAE Technical Paper Series, SAE Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition, 2002, doi:[10.4271/2002-01-2743](https://doi.org/10.4271/2002-01-2743).
- [177] Vancoillie, J., Demuynck, J., Sileghem, L., van de Ginste, M. et al., "The potential of methanol as a fuel for flex-fuel and dedicated spark-ignition engines," *Applied Energy* 102:140–149, 2013, doi:[10.1016/j.apenergy.2012.05.065](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.065).
- [178] Duan, Q., Yin, X., Wang, X., Kou, H. et al., "Experimental study of knock combustion and direct injection on knock suppression in a high compression ratio methanol engine," *Fuel* 311:122505, 2022, doi:[10.1016/j.fuel.2021.122505](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122505).
- [179] Duan, Q., Kou, H., Li, T., Yin, X. et al., "Effects of injection and spark timings on combustion, performance and emissions (regulated and unregulated) characteristics in a direct injection methanol engine," *Fuel Processing Technology* 247:107758, 2023, doi:[10.1016/j.fuproc.2023.107758](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107758).
- [180] Yang, S., Feng, J., Sun, P., Wang, Y. et al., "Combustion and emissions characteristics of methanol/gasoline CIsI engines under different injection modes," *Fuel* 333:126506, 2023, doi:[10.1016/j.fuel.2022.126506](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126506).
- [181] Gong, C., Yi, L., Zhang, Z., Sun, J. et al., "Assessment of ultra-lean burn characteristics for a stratified-charge direct-injection spark-ignition methanol engine under different high compression ratios," *Applied Energy* 261:114478, 2020, doi:[10.1016/j.apenergy.2019.114478](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114478).
- [182] Budack, R., Wurms, R., Mendl, G., and Heiduk, T., "Der neue 2,0-l-R4-TFSI-Motor von Audi," *MTZ Motortech Z* 77(5):16–25, 2016, doi:[10.1007/s35146-016-0035-2](https://doi.org/10.1007/s35146-016-0035-2).
- [183] Haase, D., Bäcker, H., Kirchner, J., and Kubach, H., "MEEMO - Methanol aus erneuerbarer Energie für Mobilität mit Plug-in-Hybridfahrzeugen : Förderbekanntmachung im Rahmen der BMWi-Förderinitiative "Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe" : Schlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 31.08.2021," *MEEMO - Methanol aus erneuerbarer Energie für Mobilität mit Plug-in-Hybridfahrzeugen*, doi:[10.2314/KXP:1849812861](https://doi.org/10.2314/KXP:1849812861).

- [184] Plaß, A., Maliha, M., Kubach, H., and Koch, T., "Spray characterization of DMC and MeFo on multi-hole injectors for highly boosted DISI combustion engines," *International Journal of Engine Research*:146808742110381, 2021, doi:[10.1177/14680874211038101](https://doi.org/10.1177/14680874211038101).
- [185] Maliha, M., Kubach, H., and Koch, T., "Influence of the MeFo and DMC Content in the Fuel on the Gasoline DI Spray Characteristics with the Focus on Droplet Speed and Size," SAE Technical Paper Series, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Digital Summit, 2021, doi:[10.4271/2021-01-1191](https://doi.org/10.4271/2021-01-1191).
- [186] Maliha, M., Ickinger, J., Kubach, H., Schumacher, O. et al., "Influence of DMC percentage in fuel on deposit formation and emission behaviour," *International Journal of Heat and Fluid Flow* 95:108949, 2022, doi:[10.1016/j.ijheatfluidflow.2022.108949](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2022.108949).
- [187] Duan, Q., Li, T., Liu, D., Yin, X. et al., "Improving the lean burn performance of a high compression ratio methanol engine by multiple-injection," *Applied Thermal Engineering* 236:121481, 2023, doi:[10.1016/j.applthermaleng.2023.121481](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121481).
- [188] Harrington, A., Hall, J., Bassett, M., and Cooper, A., "Effect of Jet Ignition on Lean Methanol Combustion Using High Compression Ratio," SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, Detroit, 2023, doi:[10.4271/2023-01-0319](https://doi.org/10.4271/2023-01-0319).
- [189] Zhou, Y., Hong, W., Xie, F., Li, X. et al., "Potential of compression ratio and exhaust gas dilution on improving combustion and nitrogen oxides emission performance on a PFI engine fueled with methanol," *Fuel* 323:124197, 2022, doi:[10.1016/j.fuel.2022.124197](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124197).
- [190] Zhou, Y., Hong, W., Xie, F., Su, Y. et al., "Effects of different valve lift adjustment strategies on stoichiometric combustion and lean burn of engine fueled with methanol/gasoline blending," *Fuel* 339:126934, 2023, doi:[10.1016/j.fuel.2022.126934](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126934).
- [191] Lai, K., Chen, H., Du, J., Zhan, W. et al., "Potentials of Air-EGR Dilution for Improving Performance of a High Compression Ratio Spark-Ignition Engine Fueled with Methanol," *Int.J Automot. Technol.* 24(4):1061–1073, 2023, doi:[10.1007/s12239-023-0087-5](https://doi.org/10.1007/s12239-023-0087-5).
- [192] Wouters, C., Burkardt, P., Fischer, M., Blomberg, M. et al., "Effects of stroke on spark-ignition combustion with gasoline and methanol," *International Journal of Engine Research* 23(5):804–815, 2022, doi:[10.1177/14680874211039685](https://doi.org/10.1177/14680874211039685).
- [193] Burkardt, P., Wouters, C., and Pischinger, S., "Potential of alcohol fuels in active and passive pre-chamber applications in a passenger car spark-ignition engine," *International Journal of Engine Research* 24(2):494–505, 2023, doi:[10.1177/14680874211053168](https://doi.org/10.1177/14680874211053168).
- [194] Suijs, W. and Verhelst, S., "Experimental Investigation of a Methanol Fueled SI Engine at Full Load Using a Central Composite Design," SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, 2022, doi:[10.4271/2022-01-0517](https://doi.org/10.4271/2022-01-0517).
- [195] Zhang, B., Chen, Y., Jiang, Y., Lu, W. et al., "Effect of compression ratio and Miller cycle on performance of methanol engine under medium and low loads," *Fuel* 351:128985, 2023, doi:[10.1016/j.fuel.2023.128985](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128985).
- [196] Feng, H., Lai, K., Zheng, Z., Lin, S. et al., "Effects of methanol direct injection and high compression ratio on improving the performances of a spark-ignition passenger car engine," *Fuel* 357:130052, 2023, doi:[10.1016/j.fuel.2023.130052](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130052).
- [197] Schwartz, S.E., Smolenski, D.J., and Clark, S.L., "Entry and Retention of Methanol Fuel in Engine Oil," SAE Technical Paper Series, SAE International Congress and Exposition, 1988, doi:[10.4271/880040](https://doi.org/10.4271/880040).

- [198] Malik, M.A.I., Usman, M., Bashir, R., Hanif, M.S. et al., "Use of methanol-gasoline blend: a comparison of SI engine characteristics and lubricant oil condition," *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 45(5):402–412, 2022, doi:[10.1080/02533839.2022.2061599](https://doi.org/10.1080/02533839.2022.2061599).
- [199] Ijaz Malik, M.A., Usman, M., Akhtar, M., Farooq, M. et al., "Response surface methodology application on lubricant oil degradation, performance, and emissions in SI engine: A novel optimization of alcoholic fuel blends," *Science progress* 106(1):368504221148342, 2023, doi:[10.1177/00368504221148342](https://doi.org/10.1177/00368504221148342).
- [200] Koch, T., Tiemann, C., Hamm, T., Ecker, H.J. et al., "Single cylinder test engines," *ATZ Autotechnol* 8(11-12):38–42, 2008, doi:[10.1007/BF03247098](https://doi.org/10.1007/BF03247098).
- [201] Menzel, F., Seidel, T., Schmidt, W., Pape, J. et al., "Einzylindermotor als Werkzeug zur Entwicklung neuer Brennverfahren," *MTZ Motortech Z* 67(3):168–173, 2006, doi:[10.1007/BF03226771](https://doi.org/10.1007/BF03226771).
- [202] Volkswagen AG, "Engine of the new Golf GTI: EA888 evo4 – GTI TSI/Euro 6d-ISC-FCM," Wolfsburg, 2022, <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/the-new-golf-gti-international-media-drive-6282/engine-of-the-new-golf-gti-6285>, Zuletzt geprüft: 10.05.22.
- [203] Schauer, F., "Untersuchung moderner ottomotorischer Brennverfahren zur Reduktion der Partikelemissionen," Dissertation, Technische Universität München, München, 2014.
- [204] Peer, J., "Erschließung von Potenzial zur CO₂- und PN-Reduzierung von Ottomotoren durch Erhöhung des Einspritzdrucks und alternative Einspritzkonzepte," Dissertation, Technische Universität München, München, 2019.
- [205] Baunach, T., Schänzlin, K., and Diehl, L., "Sauberes Abgas durch Keramiksensoren," in: *Physik Journal*:33–38.
- [206] Stanchev, R., "Ein neuer Ansatz zur Zustandsraumdarstellung, Systemanalyse und Regelung von Drei-Wege-Autoabgaskatalysatoren," Dissertation, Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2016.
- [207] Silvis, W.M., "An Algorithm for Calculating the Air/Fuel Ratio from Exhaust Emissions," SAE Technical Paper Series, International Congress & Exposition, 1997, doi:[10.4271/970514](https://doi.org/10.4271/970514).
- [208] Eicheldinger, S., Bartkowski, T., Schröder, A., Prager, D.-I.M. et al., "Experimental Investigation on the Influence of Brake Mean Effective Pressures up to 30 bar on the Behavior of a Large Bore Otto Gas Engine," SAE Technical Paper Series, 2019 JSAE/SAE Powertrains, Fuels and Lubricants, 2019, doi:[10.4271/2019-01-2224](https://doi.org/10.4271/2019-01-2224).
- [209] Schröder, A., Eicheldinger, S., Prager, M., and Jaensch, M., "Experimental mild conversion of a lean burn natural gas engine with SCR to a hydrogen engine: NO_x and GWP potential for marine applications," *International Journal of Engine Research* 24(6):2369–2387, 2023, doi:[10.1177/14680874221121032](https://doi.org/10.1177/14680874221121032).
- [210] Murali, R., Shahrman, A.B., Razlan, Z.M., Ahmad, W.K.W. et al., "A review on the correlation between exhaust backpressure and the performance of IC engine," *J. Phys.: Conf. Ser.* 2051(1):12044, 2021, doi:[10.1088/1742-6596/2051/1/012044](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2051/1/012044).
- [211] Pucher, H. and Zinner, K., "Aufladung von Verbrennungsmotoren," Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-28989-7, 2012.

- [212] Langeheinecke, K., Jany, P., Thieleke, G., Langeheinecke, K. et al., "Thermodynamik für Ingenieure," Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-03168-8, 2013.
- [213] Hepke, G., "Direkte Nutzung von Abgasenthalpie zur Eizienzsteigerung von Krafffahrzeugen," Dissertation, Technische Universität München, München, 2010.
- [214] Maier, C., "Theoretische und experimentelle Untersuchung von Energierekuperationssystemen in Verbindung mit zweistufigen thermischen Verbundverfahren bei Verbrennungskraftmaschinenanlagen," Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2015.
- [215] Bosch, W., "The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument For Display of the Characteristics of Individual Injection," SAE Technical Paper Series, National Powerplant and Transportation Meetings, 1966, doi:[10.4271/660749](https://doi.org/10.4271/660749).
- [216] Schuckert, S., "Kompensation von Alterungserscheinungen von Common-Rail-Diesel-Einspritzdüsen," Dissertation, Technische Universität München, München, 2023.
- [217] Gelner, A.D., "OME als Wegbereiter klimaneutraler und schadstofffreier Dieselmotoren," Dissertation, Technische Universität München, München, 2023.
- [218] Bernard, B., Atlan, F., and Maroteaux, D., "Simulation of Customer Usage: RENAULT's Approach for Electric Powertrains," SAE Technical Paper Series, 16th International Conference on Engines & Vehicles, Capri, 2023, doi:[10.4271/2023-24-0134](https://doi.org/10.4271/2023-24-0134).
- [219] Woschni, G., "Die Berechnung der Wandverluste und der thermischen Belastung von Dieselmotoren," in: *MTZ 31*, 1970.
- [220] Gamma Technologies, "GT-SUITE: Engine Performance Application Manual," 2022.
- [221] Kraus, C., Jakubec, P., Girhe, S., Fellner, F. et al., "Adaptation and Engine Validation of an FTIR Exhaust Gas Analysis Method for C1-Based Potential GHG-Neutral Synthetic Fuels/Gasoline-Blends Containing Dimethyl Carbonate and Methyl Formate," SAE Technical Paper Series, WCX SAE World congress experience, Detroit, 2022, doi:[10.4271/2022-01-0569](https://doi.org/10.4271/2022-01-0569).
- [222] Kraus, C., "Adaptation and Engine Validation of an FTIR Exhaust Gas Analysis Method for C1-Based Potential GHG-Neutral Synthetic Fuels/Gasoline-Blends Containing Dimethyl Carbonate and Methyl Formate [Conference presentation]," WCX SAE World Congress Experience, Detroit (USA)/Online, April 8, 2022.
- [223] Geringer, B. and Lenz, H.P., "40. Internationales Wiener Motorensymposium 15.-17. Mai 2019: Fahrspaß ohne Reue dank synthetischem Kraftstoff-Blend," Uncompromisingly fun to drive thanks to synthetic fuel blend, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, ISBN 978-3-18-381112-0, 2019.
- [224] Gopinath, D. and Ganapathy Sundaram, E., "Experimental Investigation on the Effect of Adding Di Methyl Carbonate to Gasoline in a SI Engine Performance," *International Journal of Scientific & Engineering Research* 2012(Volume3-Issue 6), 2012.
- [225] Chan, J.H., Tsolakis, A., Herreros, J.M., Kallis, K.X. et al., "Combustion, gaseous emissions and PM characteristics of Di-Methyl Carbonate (DMC)-gasoline blend on gasoline Direct Injection (GDI) engine," *Fuel* 263:116742, 2020, doi:[10.1016/j.fuel.2019.116742](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116742).

- [226] Kraus, C., "Exhaust Gas Analysis of Various Potential GHG-Neutral Synthetic Fuels and Gasoline/Alkylate- Blends Including Variable Injection Timings [Conference presentation]," SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Conference & Exhibition, Krakow (Poland), September 7, 2022.
- [227] Kraus, C., Fellner, F., Miyamoto, A., Sauerland, H. et al., "Cold Start Performance of Sustainable Oxygenated Spark Ignition Fuels: JSAE 20239089," SAE Technical Paper Series, JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting, Kyoto, 2023, doi:[10.4271/2023-32-0166](https://doi.org/10.4271/2023-32-0166).
- [228] Menrad, H., "Alkoholkraftstoffe," Innovative Energietechnik, Springer-Verlag, Wien, ISBN 978-3-7091-8663-3, 1982.
- [229] Kraus, C., "Cold Start Performance of Sustainable Oxygenated Spark Ignition Fuels [Conference presentation]," JSAE/SAE Powertrain, Energy and Lubricants, Kyoto (Japan), August 31, 2023.
- [230] Gelner, A.D., Pang, G.A., Weber, M., Haisch, C. et al., "Gaseous emissions of a heavy-duty engine fueled with polyoxymethylene dimethyl ethers (OME) in transient cold-start operation and methods for after-treatment system heating," *Environ. Sci.: Adv.* 1(4):470–482, 2022, doi:[10.1039/D2VA00080F](https://doi.org/10.1039/D2VA00080F).
- [231] Armbruster, F., Kraus, C., Prager, M., Härtl, M. et al., "Optimized Emission Analysis in Hydrogen Internal Combustion Engines: Fourier-Transform Infrared Spectroscopy Innovations and Exhaust Humidity Analysis," in: *SAE International Journal of Engines* 17(7), 2024, doi:[10.4271/03-17-07-0052](https://doi.org/10.4271/03-17-07-0052).
- [232] Stark, M., Kraus, C., Fellner, F., Härtl, M. et al., "Combined exhaust gas and optical investigation of methanol DI-engine with focus on the fuel spray-wall interaction," *International Journal of Engine Research*, 2024, doi:[10.1177/14680874241252455](https://doi.org/10.1177/14680874241252455).
- [233] Bock, N., Jeon, J., Kittelson, D., and Northrop, W., "Effects of Fuel Properties on Particle Number and Particle Mass Emissions from Lean and Stoichiometric Gasoline Direct Injection Engine Operation," SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, 2019, doi:[10.4271/2019-01-1183](https://doi.org/10.4271/2019-01-1183).
- [234] Geng, P., Zhang, H., and Yang, S., "Experimental investigation on the combustion and particulate matter (PM) emissions from a port-fuel injection (PFI) gasoline engine fueled with methanol-ultralow sulfur gasoline blends," *Fuel* 145:221–227, 2015, doi:[10.1016/j.fuel.2014.12.067](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.067).
- [235] Siewert, R.M. and Groff, E.G., "Unassisted Cold Starts to -29°C and Steady-State Tests of a Direct-Injection Stratified-Charge (DISC) Engine Operated on Heat Alcohols," SAE Technical Paper Series, 1987 SAE International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exhibition, 1987, doi:[10.4271/872066](https://doi.org/10.4271/872066).
- [236] Ishii, J., "TUM e-fuel Sample INJ Investigation Report: RE-JPIC-2202248T," 2022.
- [237] Shen, B., Su, Y., Yu, H., Zhang, Y. et al., "Experimental study on the effect of injection strategies on the combustion and emissions characteristic of gasoline/methanol dual-fuel turbocharged engine under high load," *Energy* 282:128925, 2023, doi:[10.1016/j.energy.2023.128925](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128925).

- [238] Awad, O.I., Mamat, R., Noor, M.M., Ibrahim, T.K. et al., "The impacts of compression ratio on the performance and emissions of ice powered by oxygenated fuels: A review," *Journal of the Energy Institute* 91(1):19–32, 2018, doi:[10.1016/j.joei.2016.09.003](https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.09.003).
- [239] Kraus, C., Blochum, S., Zepf, A., Wachtmeister, G. et al., "NAMOSYN-Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe: Abschlussbericht (Teil I und Teil II): C1-Ottokraftstoffe/Einzylindermotor: Laufzeit: 01.04.2019-30.09.2022: FKZ: 03SF0566T1," 2023, doi:[10.2314/KXP:1883917514](https://doi.org/10.2314/KXP:1883917514).
- [240] Su, S., Ge, Y., Wang, X., Zhang, M. et al., "Evaluating the In-Service Emissions of High-Mileage Dedicated Methanol-Fueled Passenger Cars: Regulated and Unregulated Emissions," *Energies* 13(11):2680, 2020, doi:[10.3390/en13112680](https://doi.org/10.3390/en13112680).
- [241] Heimrich, M.J., Albu, S., and Ahuja, M., "Electrically Heated Catalysts for Cold-Start Emission Control on Gasoline- and Methanol-Fueled Vehicles," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 114(3):496–501, 1992, doi:[10.1115/1.2906616](https://doi.org/10.1115/1.2906616).
- [242] IEA, "Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions," 2023.
- [243] Dejaegere, Q. and Verhelst, S., "Renewable Alternatives for Fossil Fuels in Non-Road Mobile Machinery: A Multicriteria Analysis," SAE Technical Paper Series, 16th International Conference on Engines & Vehicles, Capri, 2023, doi:[10.4271/2023-24-0086](https://doi.org/10.4271/2023-24-0086).
- [244] IEA, "International Shipping: Technology deployment," 2023, <https://www.iea.org/energy-system/transport/international-shipping#tracking>, Zuletzt geprüft: 08.01.24.
- [245] Oloruntobi, O., Chuah, L.F., Mokhtar, K., Gohari, A. et al., "Assessing methanol potential as a cleaner marine fuel: An analysis of its implications on emissions and regulation compliance," *Cleaner Engineering and Technology* 14:100639, 2023, doi:[10.1016/j.clet.2023.100639](https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100639).
- [246] Kjeld, A., Hinnemann, B., Rosenkvist, P., Sjöholm, J. et al., "MAN B&W two-stroke methanolpowered engines for small and large container vessels in the A.P Moller Maersk fleet – experience and new development: New Engine Developments - Alternative Fuels & Other New Engine Concepts," 523, in: *CIMAC Congress 23*, Busan, 2023.
- [247] Repo, J., Axelsson, M., and Heir, V., "Methanol combustion concept alternatives for new build and retrofit of 4-stroke medium speed engines: New Engine Developments - Alternative Fuels & Other New Engine Concepts," 438, in: *CIMAC Congress 23*, Busan, 2023.
- [248] Härtl, M., Blochum, S., Kraus, C., and Wachtmeister, G., "Energy Carriers for Future Mobility," in: Liebl, J., Beidl, C., and Maus, W. (eds.), *Internationaler Motorenkongress 2021*, Springer eBook Collection, 1st ed., Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-35587-6:401–420, 2021, doi:[10.1007/978-3-658-35588-3_23](https://doi.org/10.1007/978-3-658-35588-3_23).
- [249] Kraus, C., Fitz, P., Härtl, M., and Jaensch, M., "Efficiency increase for spark-ignited oxygenated fuels through adaptation of cylinder head and piston: Postersession," in: *10. International Engine Congress*, ATZlive; VDI Wissensforum, Baden-Baden, 2023.
- [250] Mitsufuji, K., Hosaka, T., Yoneya, N., Bariki, C. et al., "Laminar Burning Velocity Model and Combustion Simulation of Dimethyl Carbonate / Iso-octane Mixture: 炭酸ジメチル/イソオクタンの層流燃焼速度モデルと燃焼シミュレーション," *Journal of the Combustion Society of Japan* advpub:2203, 2022, doi:[10.20619/jcombsj.2203](https://doi.org/10.20619/jcombsj.2203).

- [251] Cotenescu, S., "Konstruktive Optimierung eines Einzylinderforschungsmotors für die Verwendung hochklopffester synthetischer Kraftstoffe," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2021.
- [252] Cotenescu, S., "Hocheffizienz Konzept - Ottomotor mit synthetischen Kraftstoffen," Semesterarbeit, Technische Universität München, München, 2022.
- [253] Gast, M., "Wassereinspritzung für Einzylindermotor - Aufbau des Wasserhochdruckmoduls," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2023.
- [254] Hasserodt, V., "Further Control Development of a Gasoline Spray Chamber for Optical Investigation in LabVIEW," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2021.
- [255] Hasserodt, V., "Development of an Automated Test Bench Monitoring System for an Internal Combustion Engine," Semesterarbeit, Technische Universität München, München, 2022.
- [256] Hasserodt, V., "Image Analysis for Spray Chamber Measurements using Neural Networks," Masterarbeit, Technische Universität München, München, 2023.
- [257] Lange, F., "Thermische Simulation eines Zylinderkopfes für die Verwendung hochklopffester potenziell klima-neutraler synthetischer Kraftstoffe," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2021.
- [258] Peris, A., "Entwicklung einer Auswerte GUI für die Verwendung eines FTIR Messgerätes sowie deren Erprobung an synthetischen Kraftstoffen," Semesterarbeit, Technische Universität München, München, 2021.
- [259] Peris, A., "Motoroptimierung für synthetische Kraftstoffe und deren Auswertung an einem Einzylinder-Forschungsmotor," Masterarbeit, Technische Universität München, München, 2022.
- [260] Schlag, F., "Integration eines Dreivegekatalysators in einen Einzylinder-Motorenprüfstand zur Untersuchung synthetischer Kraftstoffe," Semesterarbeit, Technische Universität München, München, 2021.
- [261] Ulrich, M., "Aufbau und experimentelle Untersuchung eines Prototypen-Zylinderkopfes für synthetische Kraftstoffe," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2023.
- [262] Wagner, T., "Nachhaltige synthetische Motorsportkraftstoffe - FIA-Sensor Integration am Einzylindermotorenprüfstand," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2023.
- [263] Schneider, M., "1D Simulation: Aufbau eines virtuellen Abgasturboladers für einen Einzylindermotor," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2024.
- [264] ExxonMobil Lubricants & Specialties Europe, "Mobil 1™ ESP 5W-30," Antwerpen, 2023, <https://www.mobil.com/de-de/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-1-esp-5w-30-0w-30>, Zuletzt geprüft: 09.10.23.
- [265] ExxonMobil Lubricants & Specialties Europe, "Mobil 1™ ESP 0W-30," Antwerpen, 2023, <https://www.mobil.com/de-de/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-1-esp-0w-30>, Zuletzt geprüft: 09.10.23.

Vorveröffentlichungsliste

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden Veröffentlichungen, Software und Studienarbeiten, in denen Teilaspekte dieser Arbeit vorgestellt wurden. Die zentralen Papers der kumulativen Dissertation sind hier **nicht** erneut aufgeführt.

Zeitschriften, Konferenzen, Magazine, Berichte, Konferenzvorträge und -poster, etc.; nicht Scopus/ Web of Science gelistet

[121] **Kraus, C.**, Härtl, M., and Jaensch, M., "Sustainable mobility through synthetic fuels: Spark ignition engines: Postersession," in: *9th International Engine Congress*, ATZlive; VDI Wissensforum, Baden-Baden, 2022

[131] Härtl, M., **Kraus, C.**, and Jaensch, M., "Electrification and E-Fuels – The Future of Otto- and Diesel-Engines," in: Geringer, B. and Lenz, H.P. (eds.), *Proceedings of the 43rd International Vienna Motor Symposium 27 - 29 April 2022*

[239] **Kraus, C.**, Blochum, S., Zepf, A., Wachtmeister, G. et al., "NAMOSYN-Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe: Abschlussbericht (Teil I und Teil II): C1-Ottokraftstoffe/Einzylindermotor: Laufzeit: 01.04.2019-30.09.2022: FKZ: 03SF0566T1," 2023, doi:[10.2314/KXP:1883917514](https://doi.org/10.2314/KXP:1883917514)

[248] Härtl, M., Blochum, S., **Kraus, C.**, and Wachtmeister, G., "Energy Carriers for Future Mobility," in: Liebl, J., Beidl, C., and Maus, W. (eds.), *Internationaler Motorenkongress 2021*, Springer Fachmedien Wiesbaden; doi:[10.1007/978-3-658-35588-3_23](https://doi.org/10.1007/978-3-658-35588-3_23).

[249] **Kraus, C.**, Fitz, P., Härtl, M., and Jaensch, M., "Efficiency increase for spark-ignited oxygenated fuels through adaptation of cylinder head and piston: Postersession," in: *10. International Engine Congress*, ATZlive; VDI Wissensforum, Baden-Baden, 2023.

[250] Mitsufuji, K., Hosaka, T., Yoneya, N., Bariki, C. et al., "Laminar Burning Velocity Model and Combustion Simulation of Dimethyl Carbonate / Iso-octane Mixture," *Journal of the Combustion Society of Japan*, 2022, doi:[10.20619/jcombsj.2203](https://doi.org/10.20619/jcombsj.2203)

Weitere im Rahmen der Promotion entstandene Veröffentlichungen; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

[43] Blochum, S., Gadomski, B., Retzlaff, M., Thamm, F., **Kraus C.** et al., "Potential Analysis of a DMC/MeFo Mixture in a DISI Single and Multi-Cylinder Light Vehicle Gasoline Engine," *SAE Technical Paper Series*, SAE WCX Digital Summit, 2021, doi:[10.4271/2021-01-0561](https://doi.org/10.4271/2021-01-0561)

[71] Binder, J., Kreckler, O., **Kraus, C.**, Jaensch, M. et al., "Analysis of the Piston Group Friction in a Single-Cylinder Gasoline Engine When Operated with Synthetic Fuel DMC/MeFo," *SAE*

Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, 2022, doi:[10.4271/2022-01-0485](https://doi.org/10.4271/2022-01-0485)

[110] Fellner, F., Miyamoto, A., Joerg, C., **Kraus, C.** et al., “Applications of an Advanced Multiple Injection Calibration Strategy to Address Future Emission Legislation Challenges,” *SAE Technical Paper Series*, 16th International Conference on Engines & Vehicles, 2023, doi:[10.4271/2023-24-0081](https://doi.org/10.4271/2023-24-0081)

[120] Fellner, F., Fitz, P., **Kraus, C.**, Joerg, C. et al., “Algorithm-Calculated Multiple Injection Patterns to Meet Future Requirements to Direct-Injection Spark Ignited Engines,” *SAE Technical Paper Series*, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Conference & Exhibition, 2022, doi:[10.4271/2022-01-1068](https://doi.org/10.4271/2022-01-1068)

[161] **Kraus, C.**, Fellner, F., Härtl, M., Blochum, S. et al., “Review of Potential CO₂-Neutral Fuels in Passenger Cars in Context of a Possible Future Hybrid Powertrain,” *SAE Technical Paper Series*, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Digital Summit, 2021, doi:[10.4271/2021-01-1229](https://doi.org/10.4271/2021-01-1229).

[231] Armbruster, F., **Kraus, C.**, Prager, M., Härtl, M. et al., “Optimized Emission Analysis in Hydrogen Internal Combustion Engines: Fourier-Transform Infrared Spectroscopy Innovations and Exhaust Humidity Analysis,” in: *SAE International Journal of Engines* 17(7), 2024, doi:[10.4271/03-17-07-0052](https://doi.org/10.4271/03-17-07-0052)

[232] Stark, M., **Kraus, C.**, Fellner, F., Härtl, M. et al., “Combined exhaust gas and optical investigation of methanol DI-engine with focus on the fuel spray-wall interaction,” *International Journal of Engine Research*, 2024, doi:[10.1177/14680874241252455](https://doi.org/10.1177/14680874241252455)

Betreute Studienarbeiten

Folgende Studienarbeiten entstanden an der TUM im Rahmen der vorliegenden Arbeit. Die Bearbeitung, Auswertung, Interpretation und Darstellung der Ergebnisse dieser Studienarbeiten fand unter der wesentlichen Anleitung des Autors dieser Dissertation statt. Ergebnisse flossen zum Teil in diese Arbeit ein.

[251] Cotenescu, S., “Konstruktive Optimierung eines Einzylinderforschungsmotors für die Verwendung hochklopfester synthetischer Kraftstoffe,” Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2021.

[252] Cotenescu, S., “Hocheffizienz Konzept - Ottomotor mit synthetischen Kraftstoffen,” Semesterarbeit, Technische Universität München, München, 2022.

[253] Gast, M., “Wassereinspritzung für Einzylindermotor - Aufbau des Wasserhochdruckmoduls,” Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2023.

[254] Hasserodt, V., “Further Control Development of a Gasoline Spray Chamber for Optical Investigation in LabVIEW,” Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2021.

[255] Hasserodt, V., “Development of an Automated Test Bench Monitoring System for an Internal Combustion Engine,” Semesterarbeit, Technische Universität München, München, 2022.

[256] Hasserodt, V., “Image Analysis for Spray Chamber Measurements using Neural Networks,” Masterarbeit, Technische Universität München, München, 2023.

- [257] Lange, F., "Thermische Simulation eines Zylinderkopfes für die Verwendung hochklopfester potenziell klimaneutraler synthetischer Kraftstoffe," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2021.
- [258] Peris, A., "Entwicklung einer Auswerte GUI für die Verwendung eines FTIR Messgerätes sowie deren Erprobung an synthetischen Kraftstoffen," Semesterarbeit, Technische Universität München, München, 2021.
- [259] Peris, A., "Motoroptimierung für synthetische Kraftstoffe und deren Auswertung an einem Einzylinder-Forschungsmotor," Masterarbeit, Technische Universität München, München, 2022.
- [260] Schlag, F., "Integration eines Dreiwegekatalysators in einen Einzylinder-Motorenprüfstand zur Untersuchung synthetischer Kraftstoffe," Semesterarbeit, Technische Universität München, München, 2021.
- [261] Ulrich, M., "Aufbau und experimentelle Untersuchung eines Prototypen-Zylinderkopfes für synthetische Kraftstoffe," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2023.
- [262] Wagner, T., "Nachhaltige synthetische Motorsportkraftstoffe - FIA-Sensor Integration am Einzylindermotorenprüfstand," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2023.
- [263] Schneider, M., "1D Simulation: Aufbau eines virtuellen Abgasturboladers für einen Einzylindermotor," Bachelorarbeit, Technische Universität München, München, 2024.

Anhang

| | | |
|----------|-----------------------------------|-----|
| Anhang A | Weitere Messdaten | 85 |
| Anhang B | Datenblätter Öl/Kraftstoffe | 88 |
| Anhang C | Eingebundene Publikationen..... | 100 |

Anhang A Weitere Messdaten

Liefergrad: Einfluss des Einspritzzeitpunktes im geschleppten Betrieb

Um den Einfluss des Einspritzzeitpunktes auf den Liefergrad darzustellen, wurde im geschleppten Betrieb mit verschiedenen Einspritzzeitpunkten 2 ms lang eingespritzt. Als Kraftstoff wurde Benzin verwendet. Bei gleichem Einlassdruck konnte der Luftmassenstrom durch einen geeigneten Einspritzzeitpunkt erhöht oder verringert werden. Eine Korrelation zur Einlassventilhubkurve ist ersichtlich.

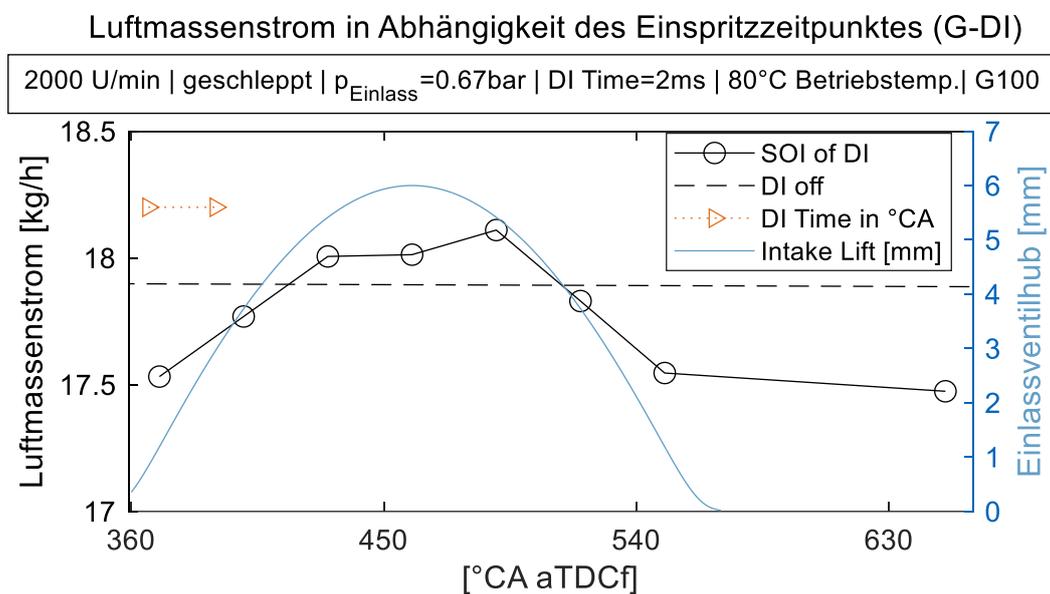


Abbildung 27: Einfluss des Einspritzzeitpunktes auf den Liefergrad

Turbolader-Simulation

Einfluss des erhöhten Abgasgegendrucks:

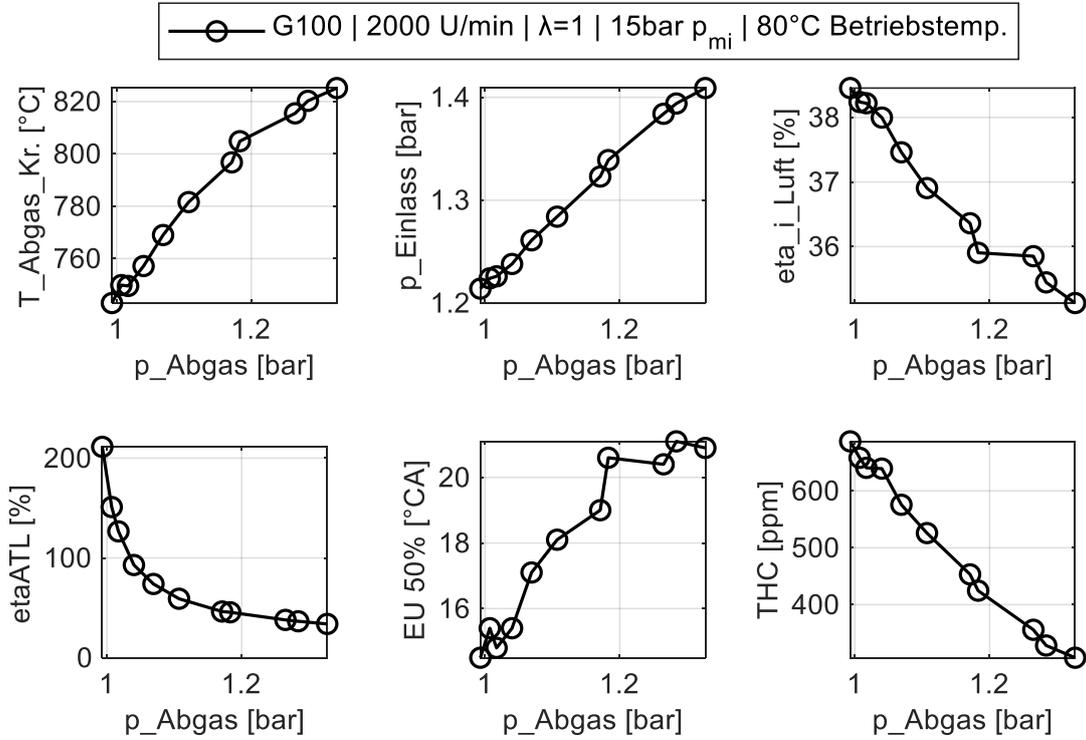


Abbildung 28: Abgasgegendruck - Einfluss auf Wirkungsgrad und Schlüsselbestandteile

Kraftstoffabhängigkeit der Einflussparameter der Turboladerhauptgleichung:

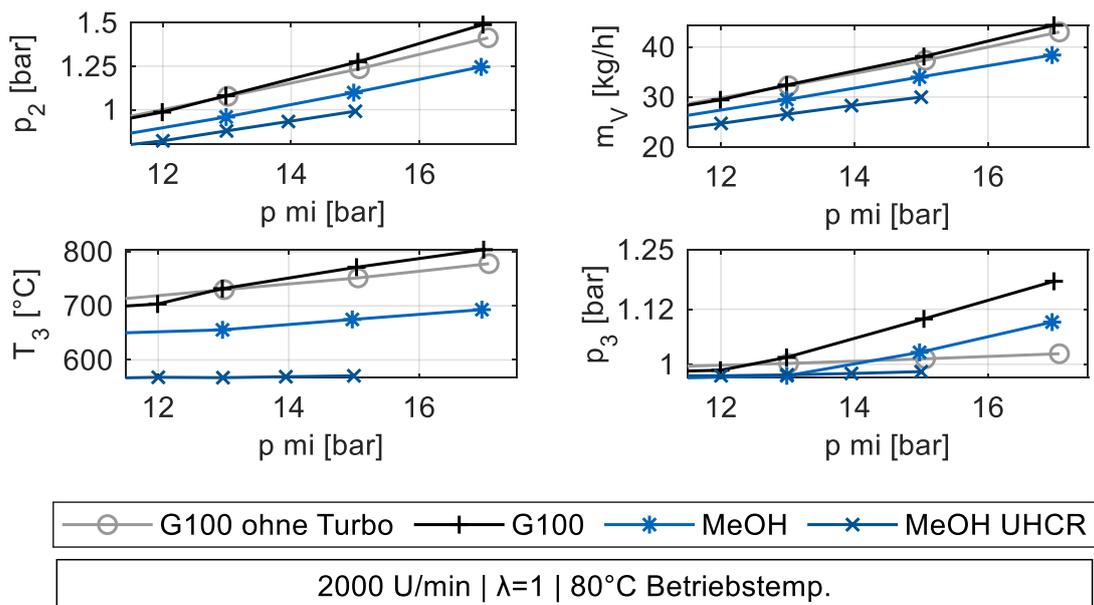


Abbildung 29: Ergebnis der Abgasturbolader-Simulation für Benzin, MeOH ($\epsilon=11/19.6$)

Zentrale-Einspritzung

Methanol als weiterer Kraftstoff wurde verwendet, um die bereits gezeigten Ergebnisse zu bekräftigen. Der Einspritzbeginn wurde für die seitliche Injektanlage variiert, um möglichst geringe PN-Emissionen zu erreichen. Ein neuerer PN-optimierter Zentralinjektor (Z-DI2) wurde verwendet. Ein SOI von 460°CA aTDCf war für den G-DI hinsichtlich Effizienz vorteilhaft. Der SOI von 430°CA aTDCf war für den Z-DI2 effizienzoptimal.

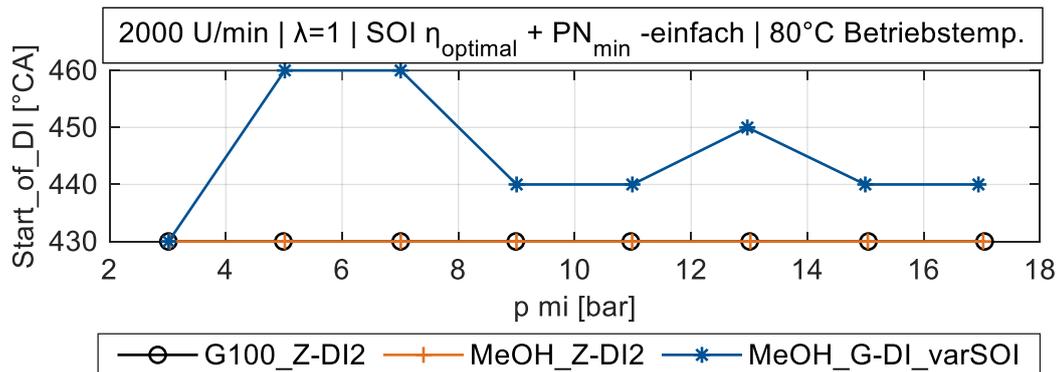


Abbildung 30: Startzeitpunkte von G-DI und zentral Injektor (Z-DI2) für Methanol

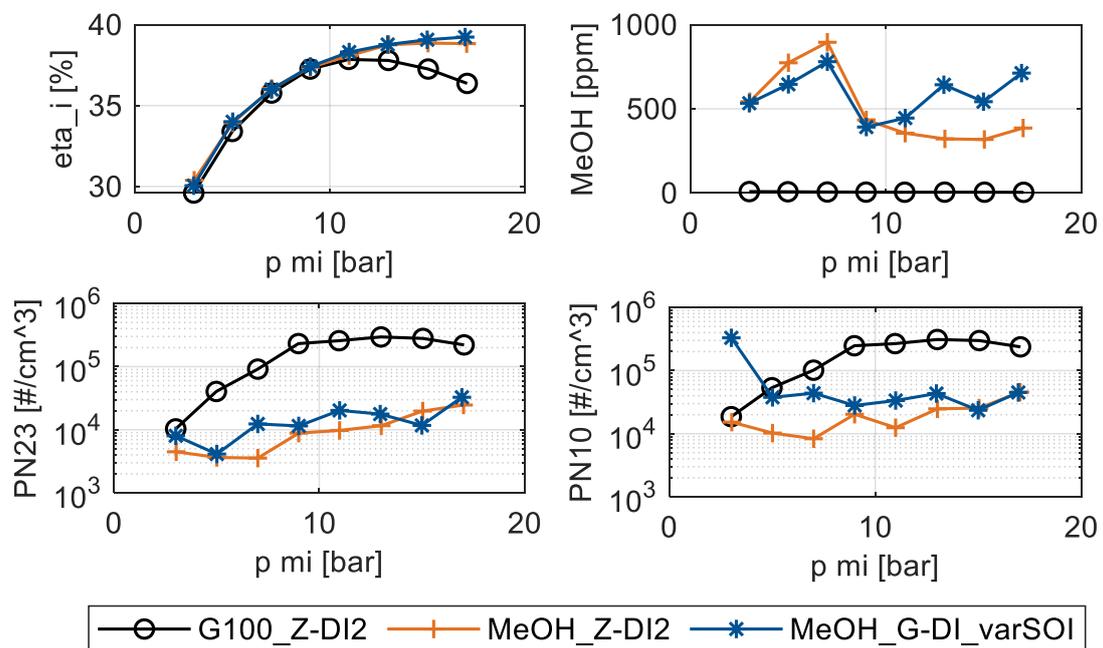


Abbildung 31: Zentrale Einspritzung (Z-DI2) im Vergleich zum G-DI für Methanol

Anhang B Datenblätter Öl/Kraftstoffe

Zwei verschieden viskose **Motoröle** wurden im Rahmen der Dissertation verwendet:

Tabelle B.1: Datenblatt Öl: Mobil 1 ESP

| | Norm | Einheit | 5W-30 [264] | 0W-30 [265] |
|--|------------|--------------------|-------------|----------------|
| Verwendet in Publikation | - | - | 1-4 | 5+Dissertation |
| Viskositätsklasse | SAE | - | 5W-30 | 0W-30 |
| Pourpoint | ASTM D97 | °C | -42 | -51 |
| Sulfatasche | ASTM D874 | Masse% | 0,8 | - |
| Flammpunkt | ASTM D92 | °C | 234 | 230 |
| Kinematische Viskosität bei 40 °C | ASTM D445 | mm ² /s | 67 | 64,8 |
| HTHS-Viskosität bei 150°C 1x10(6) sec(-1) | ASTM D4683 | mPa.s | 3,5 | - |
| Kinematische Viskosität bei 100°C | ASTM D445 | mm ² /s | 11,9 | 12,2 |
| Dichte bei 15,6 °C | ASTM D4052 | g/ml | 0,851 | 0,846 |
| Viskositätsindex | ASTM D2270 | | 175 | - |

Die Untersuchung einer Referenzprobe des 5W30 Öls bei der Oelcheck GmbH (Kerschelweg 28, 83098 Brannenburg) vom 01.06.2022 ergab folgende Werte hinsichtlich verschiedener Additive im Öl:

Tabelle B.2: Additive des 5W30 Öls-Untersuchung durchgeführt von Oelcheck GmbH

| | Norm | Einheit | 5W-30 |
|-----------|------|---------|-------|
| Kalzium | - | mg/kg | 1544 |
| Magnesium | - | mg/kg | 9 |
| Bor | - | mg/kg | 298 |
| Zink | - | mg/kg | 751 |
| Phosphor | - | mg/kg | 650 |
| Barium | - | mg/kg | 0 |
| Molybdän | - | mg/kg | 64 |
| Schwefel | - | mg/kg | 1735 |

Auf den folgenden Seiten sind die Datenblätter der **normkonformen Kraftstoffe** dargestellt:

G100->A100->P100:



Certificate of Analysis

| | | | |
|--------------------------|-----------------|------------------|-------------------------|
| Fuel Batch No: | CAF-W20/1088 | Contact: | Naoki Yoneya |
| Fuel Description: | CEC RF-02-08 E5 | Order No: | 510021 |
| Part No: | 10000048 | Customer: | Technische Universitaet |
| | | Date: | 17/03/2020 |

| Test | Method | Unit | Limit | | Result |
|-------------------------------|----------------|----------|---------|--------|--------|
| | | | Min | Max | |
| Appearance | Visual | | Report | | C&B |
| RON * | EN ISO 5164 | | 95.0 | - | 95.9 |
| MON * | EN ISO 5163 | | 85.0 | - | 85.8 |
| Density @ 15°C * | EN ISO 12185 | kg/L | 0.7430 | 0.7560 | 0.7502 |
| DVPE @ 37.8°C | EN 13016-1 | kPa | 56.0 | 60.0 | 59.8 |
| Sulfur * | EN ISO 20846 | mg/kg | - | 10.0 | 3.0 |
| Water Content | EN ISO 12937 | % v/v | - | 0.015 | 0.015 |
| Aromatics | ASTM D1319 | % v/v | 29.0 | 35.0 | 32.2 |
| Olefins | ASTM D1319 | % v/v | 3.0 | 13.0 | 4.6 |
| Saturates | ASTM D1319 | % v/v | Report | | 58.2 |
| Benzene | ASTM D6730 mod | % v/v | - | 1.00 | 0.17 |
| Oxygenates | | | Report | | |
| Methanol | ASTM D6730 mod | % v/v | Report | | <0.1 |
| Ethanol | ASTM D6730 mod | % v/v | 4.7 | 5.3 | 5.0 |
| MTBE | ASTM D6730 mod | % v/v | Report | | <0.1 |
| ETBE | ASTM D6730 mod | % v/v | Report | | <0.1 |
| Other | ASTM D6730 mod | % v/v | Report | | <0.1 |
| Oxygenates - Total | ASTM D6730 mod | % v/v | Report | | 5.0 |
| Oxidation Stability | EN ISO 7536 | min | 480 | - | >480 |
| Copper Corrosion (3h at 50°C) | EN ISO 2160 | Rating | Class 1 | - | 1A |
| Existent Gum - Washed | EN ISO 6246 | mg/100mL | - | 4 | <1 |
| Lead * | EN 237 | mg/L | - | 5.0 | <2.5 |
| Phosphorus * | ASTM D3231 | mg/L | - | 1.30 | <0.20 |
| Carbon | ASTM D6730 mod | % m/m | Report | | 84.89 |
| Hydrogen | ASTM D6730 mod | % m/m | Report | | 13.25 |
| Oxygen | ASTM D6730 mod | % m/m | 1.70 | 2.00 | 1.86 |
| H/C Mole Ratio | Calculation | | Report | | 1.86 |
| O/C Mole Ratio | Calculation | | Report | | 0.02 |
| Gross Calorific Value | ASTM D3338 mod | MJ/kg | Report | | 44.77 |
| Net Calorific Value | ASTM D3338 mod | MJ/kg | Report | | 41.98 |

CONFIDENTIAL - these data must not be divulged in full or part by the intended recipient to other third parties under any circumstances without prior written consent from Coryton Advanced Fuels Ltd. Ver 5.04 Page 1 / 2

Abbildung 32: Datenblatt G100 (1/2)



Certificate of Analysis

Fuel Batch No: CAF-W20/1088 **Contact:** Naoki Yoneya
Fuel Description: CEC RF-02-08 E5 **Order No:** 510021
Part No: 10000048 **Customer:** Technische Universitaet
Date: 17/03/2020

| Test | Method | Unit | Limit | | Result |
|-----------------------------|-------------|-------|--------|-------|--------|
| | | | Min | Max | |
| Distillation (Evaporated) * | | | | | |
| E70 | EN ISO 3405 | % v/v | 24.0 | 44.0 | 27.9 |
| E100 | EN ISO 3405 | % v/v | 48.0 | 60.0 | 50.0 |
| E150 | EN ISO 3405 | % v/v | 82.0 | 90.0 | 87.2 |
| E180 | EN ISO 3405 | % v/v | Report | | 97.0 |
| IBP | EN ISO 3405 | °C | Report | | 31.3 |
| 10% Volume Evaporated | EN ISO 3405 | °C | Report | | 55.0 |
| 20% Volume Evaporated | EN ISO 3405 | °C | Report | | 61.5 |
| 30% Volume Evaporated | EN ISO 3405 | °C | Report | | 73.9 |
| 40% Volume Evaporated | EN ISO 3405 | °C | Report | | 89.9 |
| 50% Volume Evaporated | EN ISO 3405 | °C | Report | | 100.0 |
| 60% Volume Evaporated | EN ISO 3405 | °C | Report | | 108.9 |
| 70% Volume Evaporated | EN ISO 3405 | °C | Report | | 117.6 |
| 80% Volume Evaporated | EN ISO 3405 | °C | Report | | 129.8 |
| 90% Volume Evaporated | EN ISO 3405 | °C | Report | | 160.7 |
| 95% Volume Evaporated | EN ISO 3405 | °C | Report | | 173.6 |
| FBP | EN ISO 3405 | °C | 190.0 | 210.0 | 192.2 |
| Residue | EN ISO 3405 | % v/v | - | 2.0 | 0.7 |

* Test UKAS accredited * Test performed by sub-contracted laboratory

Sample Received Condition: Good (No Seal)
Date Sample Received: 05/02/2020

Notes:

Date: 17/03/2020
 Authorised by: M Babiarz
 Fuels Formulation Scientist

Coryton Advanced Fuels Ltd
 The Manorway
 Stanford-le-Hope
 Essex SS17 9LN, UK

Tel: +44 (0)1375 665930
 Email: lab@corytonfuels.co.uk
 Website: www.corytonfuels.co.uk



Abbildung 33: Datenblatt G100 (2/2)



ASG
Analytik-Service
Gesellschaft

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss

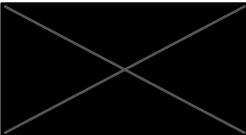
Ihr Zeichen : TSte
Ihr Auftrag : Wareneingangskontrolle
Ihr Auftrag vom : 03.11.2020
Eingegangen am : 10.11.2020
Probenahme : Kunde
Beginn der Prüfung(en) : 11.11.2020
Ende der Prüfung(en) : 25.11.2020
Prüfbericht vom : 25.11.2020
Seite : 1 von 1

Prüfbericht : 2807864-1

Prüfmuster : Alkylatbenzin Lieferung vom 03.11.2020
Gebinde : Glas - Flasche 2000 ml
ASG-ID : 2807864_001

Siegel-Nr. : -

| Prüfparameter | Prüfmethode | Prüfergebnis | Einheit |
|--------------------------------|------------------------|--------------|-------------------|
| ROZ | DIN EN ISO 5164 :2014 | 94,3 | - |
| MOZ | DIN EN ISO 5163 :2014 | 91,8 | - |
| Bleigehalt | DIN 51461-1 :2018 | <0,85 | mg/kg |
| Dichte [15 °C] | DIN EN ISO 12185 :1997 | 687,1 | kg/m ³ |
| Schwefelgehalt | DIN EN ISO 20846 :2019 | <0,5 | mg/kg |
| Mangan [Mn] | DIN EN 16136 :2015 | <0,5 | mg/l |
| Oxidationsstabilität | DIN EN ISO 7536 :1996 | >360 | min. |
| Abdampfdruckstand | DIN EN ISO 6246 :2020 | <0,5 | mg/100ml |
| Korrosionswirkung auf Kupfer | DIN EN ISO 2160 :1999 | 1 | Korr.Grad |
| Olefingehalt | | 0,05 | % (V/V) |
| Aromatengehalt | | 0,36 | % (V/V) |
| Benzolgehalt | | <0,01 | % (V/V) |
| Gesamtsauerstoff | | <0,01 | % (m/m) |
| Methanol | | <0,01 | % (V/V) |
| Ethanol | DIN EN ISO 22854 :2016 | <0,01 | % (V/V) |
| Isopropanol | | <0,01 | % (V/V) |
| Isobutanol | | <0,01 | % (V/V) |
| tert-Butanol | | <0,01 | % (V/V) |
| Ether (≥ 5 C-Atome) | | <0,01 | % (V/V) |
| andere Sauerstoffhalt. Verbdg. | | <0,01 | % (V/V) |
| Dampfdruck DVPE | DIN EN 13016-1 :2018 | 63,8 | kPa |
| Destillationsbeginn | | 28,5 | °C |
| Verdampfte Menge bei 70 °C | | 24,3 | % (V/V) |
| Verdampfte Menge bei 100 °C | DIN EN ISO 3405 :2011 | 44,6 | % (V/V) |
| Verdampfte Menge bei 150 °C | | 94,7 | % (V/V) |
| Siedeendpunkt | | 192,5 | °C |
| Destillationsrückstand | | 1,0 | % (V/V) |
| GC-VUV Report | ASTM D 8071 :2017 | siehe pdf | - |



Jürgen Bernath [Technischer Leiter]

Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts. Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0
fax +49 (0) 821 486 2519
e-mail info@asg-analytik.de

General Manager:
Dr. Th. Wilharm, J. Bernath
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

Abbildung 34: Datenblatt Alkylatbenzin (1/2)



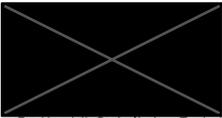
ASG Analytik-Service AG
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe
Forschungscluster 2
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss

Ihr Zeichen : -
Ihr Auftrag : -
Ihr Auftrag vom :
Eingegangen am : 29.06.2021
Einsender : Kunde
Beginn der Prüfung(en) : 29.06.2021
Ende der Prüfung(en) : 29.06.2021
Prüfbericht vom : 30.06.2021
Seite : 1 von 1

Prüfbericht: 2904505-1

| Prüfmuster | ASG-ID | Prüfparameter | Prüfmethode | Prüfergebnis | Einheit |
|---------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------------|---------|
| Alkylatbenzin | 2904505_001 | Kohlenstoffgehalt | DIN EN ISO 22854 :2016 | 83,96 | % (m/m) |
| | | Sauerstoffgehalt | | <0,01 | % (m/m) |
| | | Wasserstoffgehalt | | 16,04 | % (m/m) |
| | | Heizwert (Hu,p) | | 45,08 | MJ/Kg |



Dr. Hendrik Stein (Leiter Technikum und Testkraftstoffe)

Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugswise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts. Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de. Akkreditiert nach DIN EN ISO / IEC 17025.



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-13534-01-00

ASG Analytik-Service AG
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0
fax +49 (0) 821 450423-17
e-mail info@asg-analytik.de

Chairmen:
Dr. Th. Wilharm, J. Bernath
Amtsgericht Augsburg HRB 35618

Abbildung 35: Datenblatt Alkylatbenzin (2/2)

| TECHNICAL CHARACTERISTICS | | SPECIFICATION - EN 228 | | | |
|--------------------------------|-------------------|------------------------|--------------|---------|---------------------|
| PARAMETER | UNIT | TYPICAL VALUE | MIN | MAX | TEST METHOD |
| RON | - | 96.0-98.0 | 95.0 | - | EN ISO 5164 |
| MON | - | 85.0-87.0 | 85.0 | - | EN ISO 5163 |
| DENSITY (AT 15 °C) | kg/m ³ | 760.0-763.0 | 720.0 | 775.0 | EN ISO 12185 |
| DVPE | kPa | 48.0-52.0 | 45.0 | 90.0 | EN 13016-1 |
| SULFUR | mg/kg | <5 | - | 10 | EN ISO 20846 |
| LEAD | mg/l | <1 | - | 5 | EN 237 |
| MANGANESE | mg/l | <0.20 | - | 2.0 | EN 16135 |
| BENZENE | % V/V | 0.10-0.20 | - | 1.00 | EN ISO 22854 |
| OLEFINS | % V/V | <4.0 | - | 18.0 | EN ISO 22854 |
| AROMATICS | % V/V | 29.0-33.0 | - | 35.0 | EN ISO 22854 |
| METHANOL | % V/V | <0.3 | - | 3.0 | EN ISO 22854 |
| ETHANOL | % V/V | <0.3 | - | 10.0 | EN ISO 22854 |
| ISO-PROPYLALCOHOL | % V/V | <0.3 | - | 12.0 | EN ISO 22854 |
| ISO-BUTYLALCOHOL | % V/V | <0.3 | - | 15.0 | EN ISO 22854 |
| TERT-BUTYLALCOHOL | % V/V | <0.3 | - | 15.0 | EN ISO 22854 |
| ETHERS (5 OR MORE C ATOMS) | % V/V | 19.0-21.0 | - | 22.0 | EN ISO 22854 |
| OTHER OXYGENATES | % V/V | <0.3 | - | 15.0 | EN ISO 22854 |
| OXYGEN CONTENT | % m/m | 3.5-3.7 | - | 3.7 | EN ISO 22854 |
| INDUCTION PERIOD | minutes | >600 | 360 | - | EN ISO 7536 |
| COPPER CORROSION (3H AT 50 °C) | - | 1a | - | CLASS 1 | EN ISO 2160 |
| EXISTENT GUM - WASHED | mg/100ml | <2 | - | 5 | EN ISO 6246 |
| APPEARANCE | - | C&B | Clear&Bright | Visual | |
| NET HEATING VALUE | MJ/kg | 41.0-41.4 | - | - | DIN 51900 |
| A/F RATIO | kg Air/kg Fuel | 13.96-14.06 | - | - | Calculation |
| CARBON CONTENT | % m/m | 82.70-82.85 | - | - | EN ISO 22854 |
| HYDROGEN CONTENT | % m/m | 13.52-13.65 | - | - | EN ISO 22854 |
| FOSSIL-FREE COMPONENTS | % m/m | 100 | - | - | Mass balance |
| DISTILLATION CHARACTERISTICS | | | | | |
| E70 °C | % V/V | 31.5-34.5 | 22.0 | 50.0 | EN ISO 3405 |
| E100 °C | % V/V | 53.0-56.0 | 46.0 | 72.0 | |
| E150 °C | % V/V | 75.0-76.0 | 75.0 | - | |
| FINAL BOILING POINT | °C | <210 | - | 210 | |
| RESIDUE | % V/V | <2.0 | - | 2.0 | |

Date of compilation/revision: 2022-05-19

PLEASE READ THE SAFETY DATA SHEET (MSDS) FOR HEALTH AND SAFETY INSTRUCTIONS BEFORE USING.

Copyright © 2014 P1 Racing Fuels Limited. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical including by photocopy, recording or information storage and retrieval system, without permission in writing from P1 Racing Fuels Limited or any member company of the group.

CONTACT P1 PERFORMANCE FUELS FOR MORE INFORMATION

+49 1722772595 info@p1fuels.com

ORDER ONLINE AT:
p1fuels.com

Abbildung 36: Datenblatt P100

CERTIFICATE OF ANALYSIS

P1 RACING FUELS

Eco100Pro (P-TG-110-03)



| | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Product designation: Eco100Pro | According to: EN228 |
| Product code: P-TG-110-03 | Date: 2022-05-25 |
| Product type: Gasoline | Batch: T_P-TG-110-03_2022_03 |

PIONA – EN ISO 22854

| Carbon number | CONTENT (% m/m) | | | | | | Total |
|---------------|-----------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| | Paraffins | Isoparaffins | Olefins | Naphthenes | Aromatics | Oxygenates | |
| 1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.26 | 0.26 |
| 2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 1.29 | 0.29 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.65 |
| 5 | 3.37 | 8.13 | 0.55 | 0.23 | 0.00 | 19.56 | 31.83 |
| 6 | 1.47 | 6.84 | 1.06 | 1.39 | 0.23 | 0.00 | 10.99 |
| 7 | 0.52 | 4.22 | 0.34 | 3.36 | 2.69 | 0.00 | 11.14 |
| 8 | 0.17 | 2.95 | 0.11 | 2.41 | 8.81 | 0.00 | 14.44 |
| 9 | 0.05 | 1.42 | 0.08 | 1.18 | 11.59 | 0.00 | 14.32 |
| 10 | 0.00 | 0.66 | 0.03 | 0.32 | 7.72 | 0.00 | 8.73 |
| 11+ | 0.06 | 0.66 | 0.02 | 0.04 | 4.04 | 0.00 | 4.82 |
| Total | 6.94 | 25.16 | 2.26 | 8.92 | 35.08 | 19.82 | 98.19* |

* Unidentified components: 1.81 % (m/m)

| Carbon number | CONTENT (% V/V) | | | | | | Total |
|---------------|-----------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| | Paraffins | Isoparaffins | Olefins | Naphthenes | Aromatics | Oxygenates | |
| 1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.24 | 0.24 |
| 2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 1.69 | 0.38 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.15 |
| 5 | 4.06 | 9.79 | 0.63 | 0.23 | 0.00 | 19.97 | 34.68 |
| 6 | 1.68 | 7.81 | 1.07 | 1.38 | 0.20 | 0.00 | 12.13 |
| 7 | 0.57 | 4.63 | 0.37 | 3.33 | 2.33 | 0.00 | 11.23 |
| 8 | 0.18 | 3.15 | 0.11 | 2.33 | 7.63 | 0.00 | 13.41 |
| 9 | 0.05 | 1.47 | 0.09 | 1.12 | 9.98 | 0.00 | 12.71 |
| 10 | 0.00 | 0.68 | 0.03 | 0.30 | 6.54 | 0.00 | 7.54 |
| 11+ | 0.06 | 0.66 | 0.02 | 0.04 | 3.37 | 0.00 | 4.16 |
| Total | 8.30 | 28.56 | 2.39 | 8.73 | 30.05 | 20.21 | 98.24* |

* Unidentified components: 1.76 % (V/V)

Issued by: Dan Vrtiška, chemist 

Authorized by: Alessandro Ferrari, CTO

Date of compilation/revision: 2022-10-12

Copyright © 2014 P1 Racing Fuels Limited. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including by photocopy, recording or information storage and retrieval system, without permission in writing from P1 Racing Fuels Limited or any member company of the group.

Abbildung 37: PIONA P100

Auf den folgenden Seiten sind die Datenblätter der **synthetischen Kraftstoffe** dargestellt:

M100->DMC->MeFo->C65F35



Spezifikation

Artikelnummer: 4627

Methanol

ROTIPURAN® ≥99,9 %, p.a., ACS, ISO

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| CAS-Nummer: 67-56-1 | Druckdatum: 17.08.2023 |
| Formel: CH ₃ OH | |
| Dichte: 0,79 | |
| Molekulargewicht: 32,04 g/mol | |

Garantieanalyse

| | |
|--|---------------|
| Gehalt (GC) | ≥99,9 % |
| Farbe (Hazen) | ≤10 |
| Löslichkeit in H ₂ O | entspricht |
| Abdampfdruckstand | ≤0,0005 % |
| Acidität | ≤0,0002 meq/g |
| Alkalität | ≤0,0002 meq/g |
| Wasser | ≤0,05 % |
| Dichte (d 20 °C/20 °C) | 0,791-0,793 |
| Aceton (GC) | ≤0,001 % |
| Acetaldehyd | ≤0,001 % |
| Formaldehyd | ≤0,001 % |
| Aluminium (Al) | ≤0,00005 % |
| Barium (Ba) | ≤0,00001 % |
| Blei (Pb) | ≤0,00001 % |
| Cadmium (Cd) | ≤0,000005 % |
| Calcium (Ca) | ≤0,00005 % |
| Chrom (Cr) | ≤0,000002 % |
| Eisen (Fe) | ≤0,00001 % |
| Kobalt (Co) | ≤0,000002 % |
| Kupfer (Cu) | ≤0,000002 % |
| Magnesium (Mg) | ≤0,00001 % |
| Mangan (Mn) | ≤0,000002 % |
| Nickel (Ni) | ≤0,000002 % |
| Zinn (Sn) | ≤0,00001 % |
| Zink (Zn) | ≤0,00001 % |
| Carbonylverbindungen (als CO) | ≤0,001 % |
| KMnO ₄ reduzierende Anteile (als O) | ≤0,00025 % |
| Mit H ₂ SO ₄ verfärbbare Anteile (Hazen) | entspricht |

| | | |
|--|---|--|
| <p>Carl Roth GmbH + Co. KG Schoemperlenstraße 3-5 76185 Karlsruhe</p> | <p>Telefon 0721/5606-0 Telefax 0721/5606-149 E-Mail: info@carlroth.de</p> | <p><small>Die Firma ist eine Kommanditgesellschaft mit Sitz in Karlsruhe, Reg. Gericht Mannheim HRA 100055. Persönlich haftende Gesellschafterin ist die Firma Roth Chemie GmbH mit Sitz in Karlsruhe, Reg. Gericht Mannheim HRB 100428. Geschäftsführer: André Houdelet</small></p> |
|--|---|--|



Seite 1 von 2

Abbildung 38: Datenblatt Methanol



ASG Analytik-Service AG
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe
Forschungscluster 2
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss

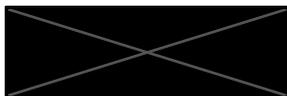
Ihr Zeichen : TGor
Ihr Auftrag : Projekt
Ihr Auftrag vom :
Eingegangen am : 08.03.2021
Einsender : Namosyn FC2
Beginn der Prüfung(en) : 16.03.2021
Ende der Prüfung(en) : 18.03.2021
Prüfbericht vom : 19.03.2021
Seite : 1 von 1

Prüfbericht: 2901674-1

| Prüfmuster | ASG-ID | Prüfparameter | Prüfmethode | Prüfergebnis | Einheit |
|------------|-------------|-------------------|------------------------|------------------|------------------|
| DMC | 2901674_001 | Brennwert (Ho,v) | DIN 51900-1 :2000 mod. | 16028 16080 | J/g |
| | | Heizwert (Hu,p)** | DIN 51900-2 :2003 mod. | 14562 14613 | J/g |
| | | Kohlenstoffgehalt | Errechnet | 40 | % (m/m) |
| | | Wasserstoffgehalt | | 6,7 | % (m/m) |
| | | Stickstoffgehalt | | 0 | % (m/m) |
| | | Sauerstoffgehalt | | 53,3 | % (m/m) |
| MeFo rein | 2901674_002 | Brennwert (Ho,v) | DIN 51900-1 :2000 mod. | 15684 15775 | J/g |
| | | Heizwert (Hu,p)** | DIN 51900-2 :2003 mod. | 14218 14309 | J/g |
| | | Kohlenstoffgehalt | Errechnet | 40 | % (m/m) |
| | | Wasserstoffgehalt | | 6,7 | % (m/m) |
| | | Stickstoffgehalt | | 0 | % (m/m) |
| | | Sauerstoffgehalt | | 53,3 | % (m/m) |
| | | | | GC-FID-Screening | ASG 1916-GC-FID* |

* unkalibriert gemessen.

** basierend auf Messung nach DIN 51900 mod. und errechneten Werten für Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt.



Tobias Goral

Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts. Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de.

ASG Analytik-Service AG
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0
fax +49 (0) 821 450423-17
e-mail info@asg-analytik.de

Chairmen:
Dr. Th. Wilharm, J. Bernath
Amtsgericht Augsburg HRB 35618

Abbildung 39: Datenblatt DMC, MeFo (1/2)



ASG
Analytik-Service

ASG Analytik-Service AG
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

ASG Analytik-Service AG
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss

Ihr Zeichen : HSte
Ihr Auftrag : Dimethylcarbonatlieferung
Ihr Auftrag vom : 29.06.2017
Eingegangen am : 30.06.2017
Einsender : Kunde
Beginn der Prüfung(en) : 03.07.2017
Ende der Prüfung(en) : 18.07.2017
Prüfbericht vom : 04.02.2021
Seite : 1 von 1

Prüfbericht: 2504973-2

Prüfmuster : Dimethylcarbonat
Aussehen : Farbe farblos, klar, frei von sichtbaren Verunreinigungen und Wasser
Gebinde : Glas - Flasche 100 ml
ASG-ID : 2504973_001

Siegel-Nr.: -

| Prüfparameter | Prüfmethode | Prüfergebnis | Einheit |
|------------------------|------------------------|---------------|-------------------|
| Dichte (15 °C) | DIN EN ISO 12185 :1997 | 1075,7 | kg/m ³ |
| Brechungsindex [20 °C] | DIN 51423-2 :2010 | 1,3687 | - |
| Wassergehalt | DIN EN ISO 12937 :2002 | 192 | mg/kg |
| GC-FID-Screening | ASG 1916-GC-FID | 99,60 | % |



Dr. Hendrik Stein (Leiter Technikum und Testkraftstoffe)

Dieser Prüfbericht ersetzt Prüfbericht 2504973-1.
Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts.
Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de.

| | | |
|---|--|--|
| ASG Analytik-Service AG Trentiner Ring 30 86356 Neusäss • Germany | phone +49 (0) 821 450423-0 fax +49 (0) 821 450423-17 e-mail info@asg-analytik.de | Chairman: Dr. Th. Wilharm, J. Bernath Amtsgericht Augsburg HRB 35618 |
|---|--|--|

Abbildung 40: Datenblatt DMC (2/2)

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

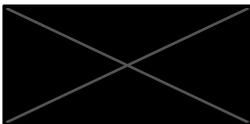
ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss

Ihr Zeichen : JBoR
Ihr Auftrag : persönlich
Ihr Auftrag vom : 08.08.2017
Eingegangen am : 08.08.2017
Einsender : Kunde
Beginn der Prüfung(en) : 09.08.2017
Ende der Prüfung(en) : 17.08.2017
Prüfbericht vom : 17.08.2017
Seite : 1 von 1

Prüfbericht : 2506023-1

Prüfmuster : Methylformiat - Lieferung vom 08.08.17
Aussehen : klar, frei von sichtbaren Verunreinigungen und Wasser
Gebinde : Glas - Flasche 250 ml
ASG-ID : 2506023_001
Siegel-Nr. : -

| Prüfparameter | Prüfmethode | Prüfergebnis | Einheit |
|------------------------|------------------|--------------|-------------------|
| Acetat | ASG 1915-IC | <50 | mg/kg |
| Brechungsindex (20 °C) | DIN 51423-2 | 1,3431 | - |
| Dichte (15 °C) | DIN EN ISO 12185 | 975,5 | kg/m ³ |
| Abdampfdruckstand | DIN EN ISO 6246 | <4 | mg/100ml |
| Methanolgehalt | ASG 1916-GC-FID | 2,53 | % (m/m) |
| Wassergehalt | DIN EN ISO 12937 | 55 | mg/kg |



Jürgen Bernath [Technischer Leiter]

Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts. Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0
fax +49 (0) 821 486 2519
e-mail info@asg-analytik.de

General Manager:
Dr. Th. Wilharm, J. Bernath
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

Abbildung 41: Datenblatt MeFo (2/2)



ASG
Analytik-Service
Gesellschaft

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentliner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

TU München - Lehrstuhl für
Verbrennungskraftmaschinen
Motorenlabor
Schragenhofstraße 31
80992 München

Ihr Zeichen : Christoph Kraus
Ihr Auftrag : E-Mail
Ihr Auftrag vom : 06.10.2020
Probenahme : ASG
Prüfbericht vom : 14.10.2020
Seite : 1 von 1

Prüfbericht: 2806890-1

Prüfmuster : 190 L Testkraftstoff DMC+ (C65F35E0)
ASG-ID : 2806890_001

| Prüfparameter | Prüfmethode | Prüfergebnis | Grenzwert DIN EN 228 :2014 | | Einheit |
|-------------------------------|------------------------|--------------|----------------------------|-------|-----------|
| | | | min. | max. | |
| ROZ | DIN EN ISO 5164 :2014 | 117 | 95,0 | - | - |
| MOZ | DIN EN ISO 5163 :2014 | >120 | 85,0 | - | - |
| Bleigehalt | DIN 51441-1 :2018 | - | - | 5,0 | mg/kg |
| Dichte (15 °C) | DIN EN ISO 12185 :1997 | 1041,1 | 720,0 | 775,0 | kg/m3 |
| Schwefelgehalt | DIN EN ISO 20846 :2012 | <0,5 | - | 10,0 | mg/kg |
| Mangan [Mn] | DIN EN 16136 :2015 | <0,5 | - | 2,0 | mg/l |
| Oxidationsstabilität | DIN EN ISO 7536 :1996 | >360 | 360 | - | min. |
| Abdampfrückstand | DIN EN ISO 6246 :2017 | <0,5 | - | 5 | mg/100ml |
| Korrosionswirkung auf Kupfer | DIN EN ISO 2160 :1999 | 1 | Klasse 1 | | Korr.Grad |
| Dampfdruck DVPE | DIN EN 13016-1 :2018 | 57,4 | - | - | kPa |
| Destillationsbeginn | DIN EN ISO 3405 :2011 | 37,5 | - | - | °C |
| Verdampfte Menge bei 70 °C | | 40,6 | - | - | % (V/V) |
| Verdampfte Menge bei 100 °C | | - | 46,0 | - | % (V/V) |
| Verdampfte Menge bei 150 °C | | - | - | 75,0 | % (V/V) |
| Siedeendpunkt | E DIN 51769-12 :2018 | 94,0 | - | 210 | °C |
| Destillationsrückstand | | 0,9 | - | 2 | % (V/V) |
| Blei [Pb] | ASG 1916-GC-FID | <3 | - | - | mg/l |
| Dimethylcarbonat [C bzw. DMC] | | 64,3 | - | - | % |
| Methylformiat [F bzw. MeFo] | | 34,4 | - | - | % |
| Methanol [MeOH] | | 1,3 | - | - | % |
| Ethanol [E bzw. EtOH] | | 0,0 | - | - | % |



Ing. Jozef Borovský (Chemieingenieur)

Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts. Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de.

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentliner Ring 30
86356 Neusäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0
fax +49 (0) 821 484 2519
e-mail info@asg-analytik.de

General Manager:
Dr. Th. Wilharm, J. Barnath
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

Abbildung 42: Datenblatt C65F35

Anhang C Eingebundene Publikationen

Kraus, C., Jakubec, P., Girhe, S., Fellner, F. et al., “Adaptation and Engine Validation of an FTIR Exhaust Gas Analysis Method for C1-Based Potential GHG-Neutral Synthetic Fuels/Gasoline-Blends Containing Dimethyl Carbonate and Methyl Formate,” SAE Technical Paper 2022-02-0569, doi.org/10.4271/2022-01-0569

Kraus, C., Fitz, P., Fellner, F., Härtl, M. et al., “Exhaust Gas Analysis of Various Potential GHG-Neutral Synthetic Fuels and Gasoline/Alkylate-Blends Including Variable Injection Timings,” SAE Technical Paper 2022-01-1085, doi.org/10.4271/2022-01-1085

Kraus, C., Fellner, F., Miyamoto, A., Sauerland, H. et al., “Cold Start Performance of Sustainable Oxygenated Spark Ignition Fuels,” JSAE Technical Paper 20239089/ SAE Technical Paper 2023-32-0166, doi.org/10.4271/2023-32-0166

Kraus, C., Fellner, F., Miyamoto, A., Sauerland, H. et al., “Injector Design and Fuel Pressure Variation for Oxygenated Spark Ignition Fuels,” SAE Technical Paper 2023-01-0306, doi.org/10.4271/2023-01-0306

Kraus, C., Thamm, F., Retzlaff, M., Gadomski, B. et al., “Highly Efficient and Clean Combustion Engine for Synthetic Fuels,” SAE Technical Paper 2023-01-0223, doi.org/10.4271/2023-01-0223