Schlussbericht (Teil I – Kurzbericht)

Titel: Darstellung der Einsetzbarkeit von „grünem", aus Industrieabgasen hergestelltem Methanol im Automobilsektor als CO2-neutralem, emissionsfreiem und global einsetzbarem Kraftstoff (C2C_Upgrade_L-VIII)

Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Förderkennzeichen: 03EW0019D
Zuwendungsempfänger: Technische Universität München
Projektträger: Projektträger Jülich (PtJ) im Auftrag des BMBF
Laufzeit: 01.08.2021 – 31.10.2025

Aufgabenstellung und Ausgangslage

Das Verbundvorhaben Carbon2Chem Phase 2 – L-VIII verfolgt das übergeordnete Ziel, einen kostengünstigen, CO_2-neutralen Seriell-Hybridantrieb („Electric Vehicle 2.0") unter Verwendung regenerativ hergestellter Kraftstoffe – insbesondere Methanol (M100) und des Methanol-Derivats A21 – zu entwickeln, in Demonstratorfahrzeugen zu erproben und hinsichtlich des Wirkungsgrads und der Emissionen zu optimieren. Der von der Obrist DE GmbH entwickelte vibrationsfreie Zweizylinder-Generator (ZVG) bildet dabei das zentrale Antriebsaggregat des Seriell-Hybridsystems. Durch die Entkopplung des Verbrennungsmotors von der Fahrzeuglast kann der ZVG in wenigen, wirkungsgradoptimierten Betriebspunkten betrieben werden. Die hohe Klopffestigkeit und Brenngeschwindigkeit von Methanol und A21 eröffnen dabei zusätzliche Potenziale zur Wirkungsgradsteigerung durch erhöhte Verdichtungsverhältnisse, die in konventionellen Antriebssystemen nicht darstellbar sind. A21 wurde als eine Mischung aus 80 % Benzin, 15 % Methanol und 5 % Ethanol definiert.

Zu Projektbeginn existierten keine Verbrennungsmotoren, die dediziert für den Betrieb mit reinem Methanol oder Methanol-Derivaten in einem Seriell-Hybridsystem ausgelegt waren. Zwar waren die hohe Klopffestigkeit (RON = 108,7 für Methanol, RON = 108,6 für Ethanol) und die hohe laminare Brenngeschwindigkeit von Methanol aus der Grundlagenforschung bekannt, aber eine systematische Übertragung dieser Eigenschaften auf den konkreten Motortyp ZVG fehlte. Ebenso lagen weder belastbare Emissionsdaten für den Betrieb mit A21 noch eine fundierte Bewertung der globalen Einsetzbarkeit von Methanol-Ethanol-Blends im Transportsektor vor. Forschungsbedarf zeigte sich insbesondere in der Applikation des Steuergerätes, der Anpassung des Einspritzsystems sowie der Untersuchung der Abgasemissionen.

Die Technische Universität München verantwortete federführend fünf Arbeitspakete: die Optimierung des Brennverfahrens (AP 3) und des Abgasmanagements (AP 4) des ZVG für den Betrieb mit A21, zwei iterative Optimierungsschleifen auf Basis von Fahrzeugerprobungsdaten (AP 11, AP 16) sowie eine Grundlagenstudie zur Eignung von Methanol und A21 als globalem Energieträger im Transportsektor (Land, Wasser, Luft) (AP 21).

Ablauf des Vorhabens

In der ersten Projektphase (2021–2023) wurde der ZVG am Motorenprüfstand der TUM aufgebaut und in Betrieb genommen. Hierzu wurde ein Hochvolt-Batteriesimulator beschafft, eine A21-kompatible Kraftstoffversorgung eingerichtet sowie umfangreiche Messtechnik installiert (Zylinderdruckindizierung, FTIR-Abgasanalytik, Partikelmesstechnik, Temperatursensorik). Der

ZVG wurde mit A21 über das gesamte Kennfeld grundvermessen, und das Abgasnachbehandlungssystem (Dreiwegekat) wurde im stöchiometrischen Betrieb sowie bei Kaltstartbedingungen erprobt. Parallel erfolgten in der ersten Phase Grundlagenuntersuchungen am bestehenden Einzylinder-Forschungsmotor, in dem die Gemischbildungs-, Zünd- und Verbrennungseigenschaften von A21 im Vergleich zu RON95-Benzin und Methanol charakterisiert wurden.

In der zweiten Phase (2023–2025) wurden auf Basis der Fahrzeugerprobungsergebnisse der Projektpartner iterative Optimierungsschleifen am ZVG durchgeführt (AP 11, AP 16), wobei Brennverfahren und Emissionen bei Betriebspunktwechseln im Fokus standen. Über die gesamte Laufzeit wurde in AP 21 die Grundlagenstudie zur globalen Eignung von MeOH/A21 erarbeitet.

Wesentliche Ergebnisse

Der ZVG wurde systematisch mit RON95-Benzin, A21, Methanol (M100) und Ethanol (E100) vermessen. Mit A21 wurde eine maximale elektrische Leistung von 30 kW erzielt, bei einem effektiven Wirkungsgrad von über 32 % und einem indizierten Wirkungsgrad von 42 % in den effizienten Betriebspunkten. Der indizierte spezifische Verbrauch lag unter 245 g/kWh. Bei Verwendung von reinem Ethanol oder Methanol konnte die Maximalleistung um über 4 kW gesteigert werden (+13 %). Die höhere Klopffestigkeit von A21 gegenüber Benzin ermöglichte das Beibehalten eines optimalen Verbrennungsschwerpunktes von 8 °KW nZOT auch bei höheren Lasten.

Eine signifikante Ungleichverteilung der Kraftstoffmasse zwischen den Zylindern wurde identifiziert, verursacht durch strömungsbedingte Verwehung des Kraftstoffs im Saugrohr. Durch Variation des Injection-Correction-Faktors wurde ein Gleichgewicht bei einem Faktor von 1,4–1,5 erreicht. Auf Basis einer CFD-Simulation der TU Dresden wurde eine Abschirmhülse für den PFI-Injektor entworfen und am NMA im 3D-Druckverfahren aus PA6CF gefertigt, mit der das Problem behoben wurde.

Im Bereich Abgasmanagement wurde ein last- und drehzahlabhängiger Lambda-Offset von ca. 0,01 zwischen ECU-Sonde und Nach-Kat-Sonde identifiziert. Die Konvertierungsrate des Drei-Wege-Katalysators betrug für Ethanol 95 %, für CO und NO_x jedoch nur ca. 60 %, was neben dem Lambda-Offset auf einen gealterten Katalysator zurückzuführen wird. Eine Anpassung des ECU-Lambdakennfelds sowie eine Führungsregelung mittels Nach-Kat-Sonde wurden als unerlässlich identifiziert.

Die Grundlagenstudie (AP 21) wurde als begutachteter Artikel veröffentlicht: Fitz, P., Fellner, F., Rößlhuemer, R., Härtl, M. et al., "Alcohol-Based Energy Carriers in Transportation: Status, Standards, and Outlook," SAE Technical Paper 2026-37-0042, 2026.

Zusammenarbeit

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt von den Partnern NMA (TU München), Obrist DE GmbH (Koordination, ZVG-Bereitstellung), RWTH Aachen (Fahrzeugvermessung, RDE-Erprobung) und TU Dresden (CFD-Simulation, motorische Untersuchungen mit M100) durchgeführt. Begleitet wurde das Vorhaben von halbjährlichen Projekttreffen vor Ort sowie zweiwöchentlichen Online-Meetings. Eine Zusammenarbeit mit weiteren Stellen ist seitens des NMA nicht erfolgt.

Carbon2Chem

Darstellung der Einsetzbarkeit von "grünem", aus Industrieabgasen hergestelltem Methanol im Automobilsektor als CO2-neutralem, emissionsfreiem und global einsetzbarem Kraftstoff (C2C_Upgrade_L-VIII)

Abschlussbericht

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Ausführende Stelle

Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile Antriebssysteme
Technische Universität München
Boltzmannstr. 15
85748 Garching

Förderkennzeichen 03EW0019D

Vorhaben Verbundvorhaben Carbon2Chem-2 L-8

Laufzeit 01.08.2021 – 31.10.2025

Projektleiter Prof. Dr. Malte Jaensch

Bearbeiter Patrick Fitz, M.Sc.

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

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis 3

Abbildungsverzeichnis 4

1. Kurzdarstellung 6

1.1. Aufgabenstellung 6

1.2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 7

1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 7

1.3.1. Einfluss von Methanol und Ethanol auf fremdgezündete Brennverfahren 8

1.4. Planung und Ablauf des Vorhabens 10

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 11

2. Eingehende Darstellung 12

2.1. Verwendung der Zuwendung und Darstellung der erzielten Ergebnisse im Einzelnen 12

2.1.1. Prüfstandsaufbau ZVG 13

2.1.2. Experimentelle Versuche am Einzylinder-Forschungsmotor 15

2.1.3. Brennverfahren und Abgasemissionen am ZVG 17

2.1.4. Ungleichverteilung der Zylinderfüllung 21

2.1.5. Katalysatorfunktion und Kraftstoff-Luft-Verhältnis 23

2.1.6. Motorrevision 25

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 27

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 28

2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 28

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens 28

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF 29

3. Literatur 30

A. Erfolgskontrollbericht 32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Eigenschaften der Methanol- und Ethanolverbrennung und Auswirkungen auf die Verwendung im Hubkolbenmotor 9

Tabelle 2 - Einzylinder-Forschungsmotor Daten 15

Tabelle 3 - ZVG-Prototypenmotor Daten 18

Tabelle 4 - Übersicht der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sowie Vergleich der Kostenplanung gemäß Projektantrag mit den tatsächlich angefallenen Kosten 27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Durchführung der Arbeitspakete 10

Abbildung 2 - Kraftstoffsystem Schema und CAD 14

Abbildung 3 - HT- und LT-Kühlkreislauf 14

Abbildung 4 - Brennraumdruckverlauf und gemittelter Heizverlauf @ 7bar p_{mi} / 2000 1/min / SOI = 450 °KW nZOT 16

Abbildung 5 - COV_{pmi} / EU50 / ZZP / CO / NOx 16

Abbildung 6 - Partikelzahl bei 10 und 23 nm Cut-Off 17

Abbildung 7 - A21 Kennfeld: Elektrische Leistung / η_e / η_i / b_i 18

Abbildung 8 - A21 Kennfeld: EU50 und p_{mi} für beide Zylinder 19

Abbildung 9 - A21 Kennfeld: $COVp_{mi}$ 20

Abbildung 10 - A21 Kennfeld: NO_x, CO und THC_{eq} 20

Abbildung 11 - Leistungssteigerung mit Ethanol und Methanol 21

Abbildung 12 - Einfluss des Injection-Correction-Faktors 22

Abbildung 13 - Lambdavergleich vor/nach Kat anhand von NO_x und CO 23

Abbildung 14 - Konvertierungsrate des Drei-Wege-Katalysators 24

Abbildung 15 - Last- und Drehzahlabhängigkeit des Lambda-Offsets 24

Abbildung 16- NOx und CO vor und nach Kat 25

Abbildung 17 - Gleit- und Lagerflächen 25

Abbildung 18 – Gleitsteine für Stößelstangen 26

Abbildung 19 - Defektes Miba-Zahnrad 26

1. Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben Carbon2Chem Phase 2 – L-VIII verfolgt das übergeordnete Ziel, einen kostengünstigen, CO_2-neutralen Seriell-Hybridantrieb („Electric Vehicle 2.0") unter Verwendung regenerativ hergestellter Kraftstoffe – insbesondere Methanol (M100) und des Methanol-Derivats A21 – zu entwickeln, in Demonstratorfahrzeugen zu erproben und hinsichtlich des Wirkungsgrads und der Emissionen zu optimieren. Der von der Obrist DE GmbH entwickelte vibrationsfreie Zweizylinder-Generator (ZVG) bildet dabei das zentrale Antriebsaggregat des Seriell-Hybridsystems. Durch die Entkopplung des Verbrennungsmotors von der Fahrzeuglast kann der ZVG in wenigen, wirkungsgradoptimierten Betriebspunkten betrieben werden. Die hohe Klopffestigkeit und Brenngeschwindigkeit von Methanol und A21 eröffnen dabei zusätzliche Potenziale zur Wirkungsgradsteigerung durch erhöhte Verdichtungsverhältnisse und abgemagerten Betrieb, die in konventionellen Antriebssystemen nicht darstellbar sind.

Die Aufgabe der Technischen Universität München innerhalb des Verbundvorhabens umfasste fünf Arbeitspakete: In AP 3 war das Brennverfahren des ZVG für den Betrieb mit A21 zu optimieren, wobei Grundlagenuntersuchungen an einer Einspritzkammer und einem Einzylinder-Forschungsmotor die Gemischbildungs-, Zünd- und Verbrennungseigenschaften von A21 charakterisieren sollten. A21 wurde als eine Mischung aus 80 % Benzin, 15 % Methanol und 5 % Ethanol definiert. In AP 4 war das Abgasmanagement des ZVG für A21 zu untersuchen, einschließlich der Bewertung reglementierter und nicht reglementierter Emissionen (insbesondere C1-Verbindungen wie Formaldehyd) mittels FTIR-Spektroskopie sowie der Identifikation von Glühzündungsrisiken (LSPI). Aufbauend auf den Ergebnissen der Fahrzeugerprobung durch die Verbundpartner, waren in AP 11 und AP 16 jeweils iterative Optimierungsschleifen am Motorenprüfstand der TUM durchzuführen, mit besonderem Fokus auf Brennverfahren und Emissionen bei Betriebspunktwechseln. In AP 21 schließlich war eine Grundlagenstudie zur globalen Einsetzbarkeit von Methanol-Ethanol-Blends als Energieträger im gesamten Transportsektor (Land, Wasser, Luft) zu erarbeiten und in einem Review-Artikel zu publizieren.

1.2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Forschungsprojekt Carbon2Chem-2 L-8 wurde von August 2021 bis Oktober 2025 vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) mit Hilfe des Projektträgers Jülich (PtJ) gefördert. Die Koordination des Gesamtprojektes hat dabei Obrist DE GmbH übernommen, die Teilprojekte wurden von den Forschungsstellen RWTH Aachen, TU Dresden und TU München übernommen. Begleitet wurde das Vorhaben von halbjährlichen Projekttreffen vor Ort, alternierend zwischen den Partnern. Ergebnisse zwischen den Partnern wurden laufend alle 2 Wochen in Online-Meetings ausgetauscht. In Zwischenberichten wurden Meilensteine und Ergebnisse jährlich dokumentiert. Forschungsbedarf im Bereich des Prototypenmotors zeigte sich ausgehend vom Stand der Technik und der durchgeführten Versuche insbesondere den Kernthemen:

- Applikation des Steuergerätes
- Anpassung des Einspritzungssystem
- Untersuchung der Abgasemissionen

Beim NMA lag die Leitung des Teilprojektes bei Herrn Prof. Dr. Malte Jaensch. Für die Ausarbeitung der Projektinhalte war Patrick Fitz verantwortlich. Unterstützt wurde das Projekt zusätzlich von Herrn PD Dr.-Ing. habil. Martin Härtl.

1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der stetig steigende weltweite Energiebedarf verlangt einen nachhaltigen und umweltschonenden Umgang mit Rohstoffen. Rund 80 % der weltweiten Primärenergieversorgung von 648 EJ werden weiterhin aus fossilen Quellen gedeckt, wobei der Transportsektor mit etwa 30 % des finalen Energieverbrauchs und 15,9 % der globalen Treibhausgasemissionen eine zentrale Rolle bei der Dekarbonisierung einnimmt [1, 2]. Die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas sind endlich und tragen mit den bei ihrer energetischen Umsetzung entstehenden Abgasen wie CO_2, CH_xund NO_xzur globalen Erderwärmung und Umweltbelastung bei [3]. In diesem Zusammenhang rücken mit Methanol

(CH_3OH) und Ethanol (C_2H_5OH) zunehmend zwei flüssige Alkoholkraftstoffe in den Fokus, die unter Umgebungsbedingungen lager- und handhabbar sind und mit volumetrischen Energiedichten von 15,9 MJ/L (Methanol) bzw. 21,3 MJ/L (Ethanol) deutlich höhere Werte aufweisen als gasförmige Alternativen wie komprimierter Wasserstoff (5,6 MJ/L bei 700 bar), ohne kryogene oder hochdruckbasierte Speicherinfrastruktur zu erfordern [4, 5]. Beide Alkohole können nachhaltig erzeugt werden: Methanol über die katalytische Hydrierung von CO_2 mit grünem Wasserstoff (e-Methanol) oder die Vergasung lignozellulosischer Biomasse (Biomethanol), Ethanol über die Fermentation zucker- oder stärkehaltiger Rohstoffe (1G-Bioethanol) sowie lignozellulosischer Reststoffe (2G-Bioethanol) im Rahmen von Power-to-Liquid (PtL)- bzw. Biomass-to-Liquid (BtL)-Verfahren [6]. Mit Kohlenstoffintensitäten von ca. 13,9 g CO_{2eq}/MJ für e-Methanol und rund 24 g CO_{2eq}/MJ für 2G-Bioethanol – verglichen mit etwa 90 g CO_{2eq}/MJ für fossiles Benzin – bieten grün erzeugte Alkoholkraftstoffe ein erhebliches Potenzial zur Defossilisierung des Transportsektors [7, 8]. Zusätzlich versprechen beide Alkohole durch ihren hohen Sauerstoffgehalt (49,93 % w/w bei Methanol, 34,73 % w/w bei Ethanol) und die vergleichsweise einfache Molekülstruktur eine deutliche innermotorische Emissionsreduzierung gegenüber konventionellen Kraftstoffen.

1.3.1. Einfluss von Methanol und Ethanol auf fremdgezündete Brennverfahren

Verhelst et al. 2019 [4], Turner et al. 2018/2020 [9, 10], Wouters et al. 2023 [11] und Kraus et al. 2023 [12] gehen allgemein auf die Vor- und Nachteile von reinen Alkoholkraftstoffen (M100, E100) sowie von Methanol- bzw. Ethanol-Benzin-Gemischen (MXX, EXX) in SI-Motoren mit Port- und Direkteinspritzung ein. Die Untersuchungen umfassen Hubvolumina vom PKW-Einzylinder bis hin zu Nutzfahrzeug-Applikationen sowie Studien zu verschiedenen Mischungsverhältnissen (E5 bis M100/E100) hinsichtlich Brennverfahrensgrenzen, Wirkungsgradpotenzial, Abgasemissionen, Kaltstartverhalten und Betriebsstrategien. Hierfür kommt die übliche Indizier-, Abgas- und Temperaturmesstechnik zum Einsatz, wobei bei der Bestimmung unverbrannter Kohlenwasserstoffe eine angepasste Response-Faktor-Kalibrierung des FID für sauerstoffhaltige Verbindungen erforderlich ist [13, 14]. Je nach Mischungsverhältnis, Einspritzstrategie und Brennverfahren (stöchiometrisch/mager) können die physikalisch-chemischen Eigenschaften beider Alkohole sowohl zu einer signifikanten Verbesserung des Wirkungsgrads und der Emissionen als auch zu nachteiligen Effekten beim Kaltstart und in der Gemischaufbereitung führen. Die hohen Research-Oktanzahlen (RON = 108,7 für Methanol,

RON = 108,6 für Ethanol) ermöglichen eine Anhebung des geometrischen Verdichtungsverhältnisses, wodurch in [12] eine Steigerung des indizierten Wirkungsgrades um 4 %-Punkte bei 15 bar IMEP durch eine Erhöhung von ε = 9,6 auf ε = 15 nachgewiesen wurde. Gleichzeitig führen die hohen Verdampfungsenthalpien (1100 kJ/kg für Methanol, 900 kJ/kg für Ethanol, ca. 2,6- bzw. 2,1-fach höher als bei Benzin) insbesondere bei Direkteinspritzung zu einem ausgeprägten Ladungskühlungseffekt, der die Klopfneigung reduziert und eine Lasterweiterung bis 30 bar IMEP erlaubt [11, 15]. Dieselbe Eigenschaft erschwert jedoch das Kaltstartverhalten unter 10 °C und erfordert angepasste Einspritzsysteme, erhöhte Raildrücke oder den Einsatz niedrigsiedender Additive [12, 16].

Tabelle 1 - Eigenschaften der Methanol- und Ethanolverbrennung und Auswirkungen auf die Verwendung im Hubkolbenmotor

Eigenschaft Methanol/Ethanol	**Nachteil**	**Vorteil**
Verdampfungsenthalpie ↑	Kaltstartverhalten ↓, Wandfilmbildung ↑, HC-/CO-Emissionen ↑	Ladungskühlung ↑, Klopfneigung ↓, NO_x-Emissionen ↓, Verdichtungsverhältnis ↑
RON ↑ / CN ↓	Nicht selbstzündfähig (CI-Betrieb nur mit Zündhilfen)	Klopffestigkeit ↑, Verdichtungsverhältnis ↑, thermodyn. Wirkungsgrad ↑
Sauerstoffgehalt ↑ (≈ 50 % bzw. 35 % w/w)	Höhere Einspritzmenge (AF-R_{ST} = 6,49 / 9,00), erhöhter Volumenbedarf der Tankanlage	Premixed-Oxygen-Effekt, vollständigere Verbrennung, CO-/HC-Reduktion
Kurze / fehlende C–C-Bindungsstruktur	—	Stark reduzierte Rußbildung, PN10/PN23 ↓
Niedriger Siedepunkt (65 °C / 78 °C), hoher Flammpunkt (11 °C / 13 °C)	Ausbleiben leichtsiedender Komponenten → Kaltstartproblematik	—
Heizwert ↓ (20,09 MJ/kg / 26,95 MJ/kg)	Höherer Kraftstoffmassenstrom, größeres Tankvolumen erforderlich	—

Ein optimaler Kompromiss zwischen Einspritzsystem, Verdichtungsverhältnis, Abgasnachbehandlung und Brennverfahren muss daher für den Einsatz von Methanol und Ethanol in Ottomotoren gefunden werden [4, 11, 17].

1.4. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt Carbon2Chem gliedert sich in fünf durch den Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile Antriebssysteme untersuchte Teilbereiche:

- AP 3 ZVG Optimierung Brennverfahren für A21
- AP 4 ZVG Optimierung Abgasmanagement für A21
- AP 11 ZVG Optimierungsloop für A21 (Basierend aus den Ergebnissen aus AP8 & AP9)
- AP 16 Weitere Komponenten- und Systemoptimierungen basierend auf Testergebnissen für A21
- AP21 Untersuchung der Eignung von MeOH & A21 als globaler Energieträger im Transportsektor (LKW / Schiff / Flugzeug) zur Erreichung der Paris-Klimaziele in 2050

In Abbildung 1 ist die Planung der Durchführung der Arbeitspakete im Vergleich zur tatsächlichen Durchführung dargestellt. Die Verschiebung der Arbeitspakete mit Motorbetrieb wurde durch die verzögerte Lieferung des ZVGs sowie den langen Beschaffungsprozess des Batteriesimulators verursacht. Die wesentlichen experimentellen Untersuchungen konnten mit der Verlängerung erfolgreich durchgeführt werden.

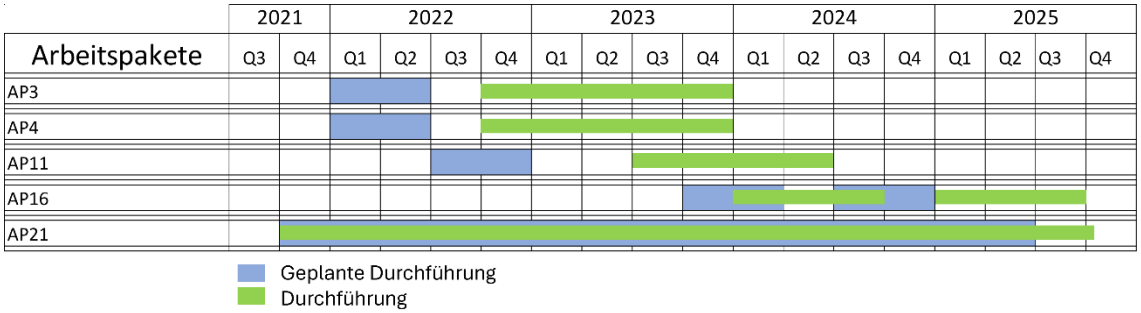

Abbildung 1 - Durchführung der Arbeitspakete

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt eigenständig von den Verbundpartnern, bestehend aus dem Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile Antriebssysteme (NMA) der TU München, Obrist DE GmbH, RWTH Aachen und TU Dresden, durchgeführt. Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen ist seitens des NMA nicht erfolgt.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und Darstellung der erzielten Ergebnisse im Einzelnen

Am Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile Antriebssysteme wurden experimentelle thermodynamische Grundlagenuntersuchungen zu den regenerativen Kraftstoffen Methanol und Ethanol sowie zu deren Blends mit Benzin durchgeführt. Als Zündsystem kam ein konventionelles Zündkerzenverfahren zum Einsatz. Hierfür wurde zum einen ein bestehender Einzylinder-Versuchsmotor in PKW-Größe herangezogen, zum anderen wurde für eine weitere Prüfstandszelle ein neuer Prüfstandsaufbau entwickelt und installiert, in dem der ZVG integriert wurde. Ziel war es, thermodynamische Grundvermessungen durchzuführen sowie Optimierungsloops für die verschiedenen Kraftstoffe zu erarbeiten, um ein vertieftes Verständnis der Brennverfahren und Emissionen zu gewinnen. Begleitet wurden die experimentellen Untersuchungen durch Literaturrecherchen zu Alkoholkraftstoffen im Transportsektor mit dem Ziel einer Veröffentlichung.

Das Vorhaben ist in die Arbeitspakete:

- AP 3 ZVG Optimierung Brennverfahren für A21
- AP 4 ZVG Optimierung Abgasmanagement für A21
- AP 11 ZVG Optimierungsloop für A21 (basierend auf den Ergebnissen aus AP 8 & AP 9)
- AP 16 Weitere Komponenten- und Systemoptimierungen basierend auf Testergebnissen für A21
- AP 21 Untersuchung der Eignung von MeOH & A21 als globaler Energieträger im Transportsektor (LKW/Schiff/Flugzeug) zur Erreichung der Paris-Klimaziele 2050

gegliedert.

2.1.1. Prüfstandsaufbau ZVG

Für den ZVG wurde eine Messzelle am Lehrstuhl angepasst. Der ZVG ist ein 4-Takt-Prototypen-Hybridmotor in serieller Ausführung. Der Verbrennungsmotor hat zwei Zylinder mit zwei entgegenlaufenden Kurbelwellen, die über Zahnräder mit der Generator-Einheit verbunden sind. Die Schwerpunkte des Aufbaus lagen in den Bereichen elektrische Anbindung an den Batteriesimulator, Kraftstoffversorgung, Kühlmittelversorgung und Messdatenerfassung.

Für die elektrische Anbindung wurden HV-Kabel durch das Gebäude gezogen, eine HV-Breakoutbox am Prüfstand gebaut und die HV-Verbindung zum ZVG hergestellt. Dabei wurde eine Interlock-Linie in das bestehende Notaussystem des Prüfstands integriert. Diese dient dazu, sicherheitsrelevante Betriebsparameter kontinuierlich zu überwachen und bei Überschreitung definierter Grenzwerte, etwa bei Leckagen oder Ausfällen von Geräten, eine automatische Abschaltung des Prüfstands auszulösen.

Die Kraftstoffversorgung umfasst einen Haupttank mit 100 Liter Fassungsvermögen sowie zwei kleinere Tanks, die den schnellen Wechsel des Kraftstoffs ermöglichen. Mit einer Waage und einem elektromagnetischen Ventil wurde ein Tank zur Bestimmung des gravimetrischen Kraftstoffmassenflusses genutzt. Für die Druckerzeugung wurde eine Niederdruckpumpe mit bis zu 7 bar Druck, ausreichendem Volumenstrom sowie einem Filter verbaut. Der geforderte Druck wurde mit einem Druckregelventil eingestellt. Die Temperatursteuerung wurde mittels eines Konditionierzwischenkreises mit Wärmetauscher und Heizelement realisiert. Als Materialien wurden Edelstahl für Verschraubungen, Aluminium für Tanks und PTFE für Schläuche verwendet, um den korrosiven Eigenschaften der Kraftstoffe, insbesondere von Methanol, standzuhalten. Das Schema der Kraftstoffversorgung mit CAD-Aufbau ist in der Abbildung 2 dargestellt.

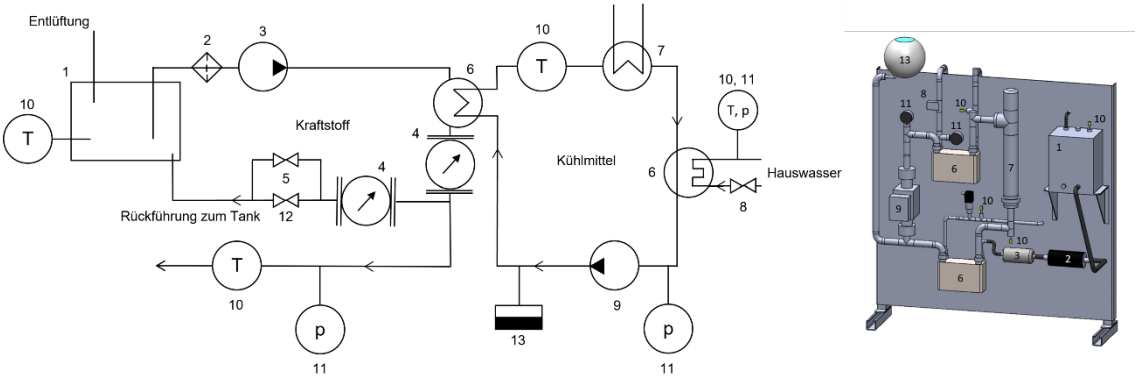

Abbildung 2 - Kraftstoffsystem Schema und CAD

Das Kühlmittelsystem wurde in zwei Subsysteme unterteilt: HT (High temperature) und LT (Low temperature), wie in Abbildung 3 dargestellt. Der HT-Kreislauf dient der Vorkonditionierung und Kühlung des Verbrennungsmotors mit Wärmetauscher und Heizelement und wurde auf 60-80 °C geregelt. Der LT-Kreislauf kühlt die elektrische Maschine des Hybridmotors sowie den Inverter. Die Temperatur wurde unter 60 °C gehalten.

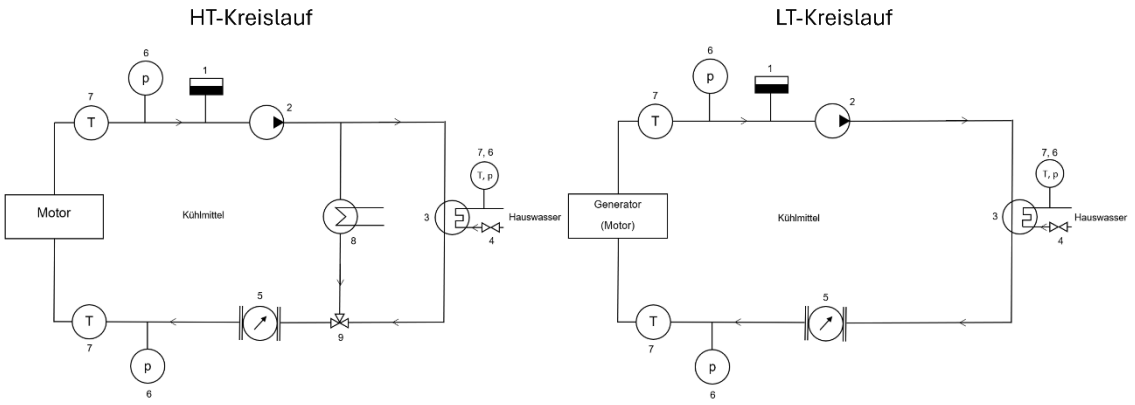

Abbildung 3 - HT- und LT-Kühlkreislauf

Das zentrale Element der Messdatenerfassung ist ein NI PXIe 8135 Automatisierungssystem mit Messkarten für Thermoelemente, analoge sowie digitale Ein- und Ausgänge und CAN-BUS-Verbindungen. Zur Steuerung und Visualisierung der Betriebsdaten wurde eine GUI am Prüfstands-PC in der Warte aufgebaut. Die digitalen und analogen Ausgänge schalteten Steuerrelais in einem Schaltschrank, welcher die Aktoren wie Ventile und Pumpen ansteuerte.

Sensortechnik

Der Motor wurde mit verschiedenen Druck- und Temperatursensoren sowie einem Indiziersystem ausgestattet. Das Indiziersystem besteht aus einem Einlassdrucksensor, einem Auslassdrucksensor und einem Brennraumdrucksensor für jeden Zylinder mit einer Samplingrate von 500 kHz. In Kombination mit dem Drehgebersignal wurde eine Auflösung von 0,1° Kurbelwinkel (°KW) bei den Druckdaten erreicht. Die Indizierdrucksensoren und Messverstärker stammten von der Firma Kistler.

2.1.2. Experimentelle Versuche am Einzylinder-Forschungsmotor

Der Einzylinder-Forschungsmotor wurde zur Grundvermessung des Kraftstoffes A21 im Vergleich zu Methanol und RON95-Benzin eingesetzt. Die Eckdaten des Motors sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2 - Einzylinder-Forschungsmotor Daten

Motorbasis	Audi EA888	**Motorlast**	0 – 17 bar p_{mi}
Bohrung	82,51 mm	**Drehzahl**	1000 – 3500 1/min
Hub	86,6 mm	**Öl- und Kühlmitteltemperatur**	80 °C
Kompressionsverhältnis	10,9	**Einspritzsystem und -druck**	DI bis 500bar PFI bis 6 bar

Die folgenden Versuche wurden mit den Kraftstoffen RON95-Benzin, A21 und Methanol durchgeführt. Das DI-Einspritzsystem mit einem Systemdruck von 350 bar wurde dafür verwendet. Zur Abgasanalyse wird ein Standard-Gasanalysator Mexa One D1 verwendet. Weiters ein FTIR-Messgerät der Firma IAG und ein SPCS Partikelzählsystem mit CPCs mit den Cut-Off-Sizes 10 und 23 nm.

In Abbildung 4 ist der Vergleich von Benzin, A21 und Methanol bei einem Betriebspunkt mit 7 bar p_{mi}, 2000 1/min, SOI_{DI} = 450°KW nZOT (Start of Injection) und Kraftstoffdruck von 350 bar dargestellt. A21 unterscheidet sich geringfügig von Benzin; der Methanolanteil sorgt für eine schnellere Verbrennung. Methanol hat dennoch eine deutlich schnellere Energieumsetzung und einen größeren Druckgradienten.

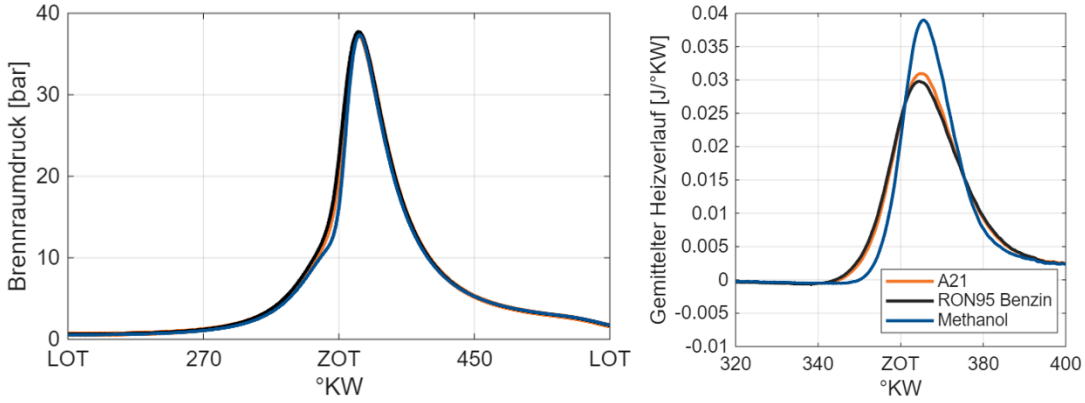

Abbildung 4 - Brennraumdruckverlauf und gemittelter Heizverlauf @ 7bar p_{mi} / 2000 1/min / SOI = 450 °KW nZOT

In Abbildung 5 sind Lastschnitte mit Benzin, A21 und Methanol bei einem Kraftstoffdruck von 350 bar und SOI von 430°KW nZOT gezeigt.

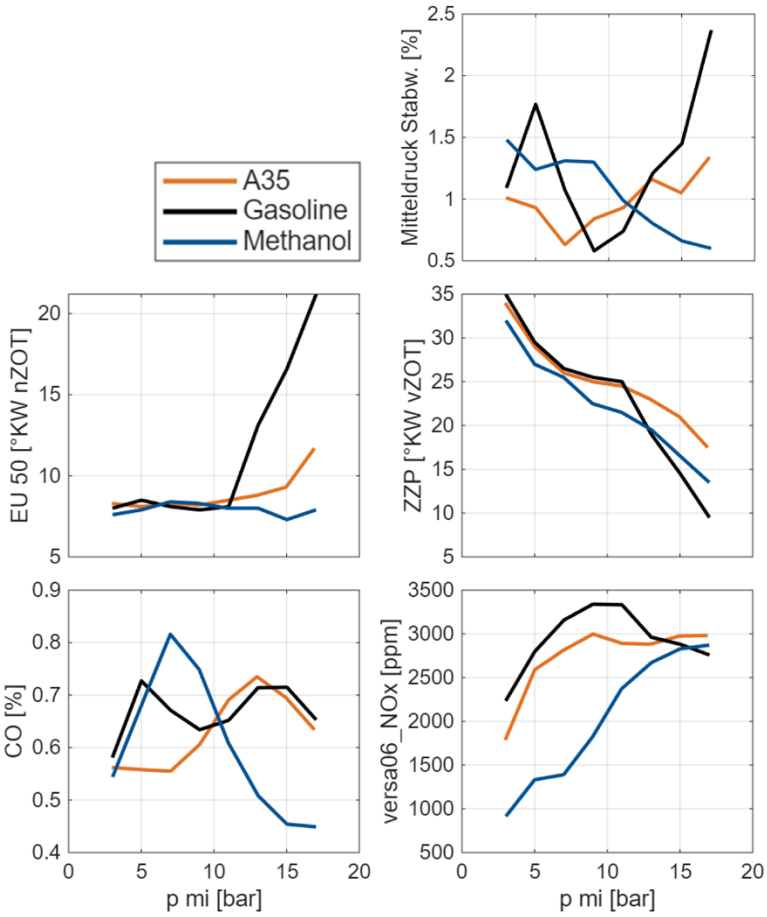

Abbildung 5 - COV_{pmi} / EU50 / ZZP / CO / NOx

Die Mitteldruckstandardabweichung (COV_{pmi}) zeigt für alle Kraftstoffe ähnliche Werte. Bei 15 und 17 bar p_{mi} steigt die Standardabweichung von Benzin, da ein späterer Verbrennungsschwerpunkt aufgrund von Klopfen gewählt werden muss, was im EU50 ersichtlich ist. A21 ist etwas klopfresistenter, dadurch kann ein Verbrennungsschwerpunkt von 8°KW nZOT besser gehalten werden. Bei mittlerer Last zeigt Methanol die höchsten CO-Emissionen, die mit steigender Last abnehmen und unter denen von Benzin und A21 liegen. Die erhöhte Verdampfungsenthalpie von Methanol verringert die thermische NO_x-Bildung bei A21, und der Effekt ist bei reinem Methanol am größten. Bei hoher Last sinken die NO_x-Emissionen von Benzin, während sie bei A21 aufgrund der Spätverschiebung konstant bleiben. Methanol kann weiterhin mit optimalen EU50 betrieben werden.

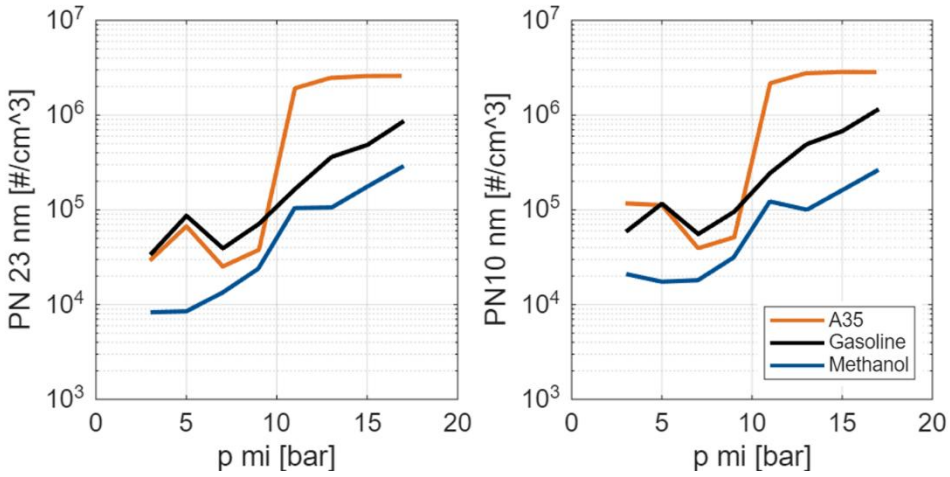

Abbildung 6 - Partikelzahl bei 10 und 23 nm Cut-Off

In Abbildung 6 sind die Partikelemissionen für die Cut-off-Sizes 10 und 23 nm dargestellt. Benzin und A21 sind bei geringer Last auf einem ähnlichen Niveau; ab 11 bar p_{mi} steigen die Partikelemissionen von A21 deutlich an. Aufgrund der fehlenden Kohlenstoffverbindungen in Methanol sind die Partikelemissionen im Vergleich um einen Potenzfaktor geringer.

2.1.3. Brennverfahren und Abgasemissionen am ZVG

Im Zuge der Prüfstandversuche wurden mehrere Kennfelder für A21, Methanol, Ethanol und RON95-Benzin vermessen. Der Schwerpunkt liegt jedoch auf den A21-Kennfeldern. In Tabelle 3 sind die Motordaten des ZVGs aufgeführt. Es handelt sich um einen fremdgezündeten 4-Takt-Zwei-Zylinder-Hybridmotor mit Saugrohreinspritzung und 1l Hub-

raum. Die Kurbelwellen sind über Zahnräder miteinander und mit dem Generator verbunden. Dieser kann im Motor- und Generatorbetrieb arbeiten, sodass auch der Verbrennungsmotor aus dem Stillstand auf die gewünschte Drehzahl beschleunigt werden kann.

Tabelle 3 - ZVG-Prototypenmotor Daten

Motorbasis	Prototyp	**Max. Ansaugdruck**	WOT
Bohrung	86 mm	**Drehzahl**	1500 – 5000 1/min
Hub	86 mm	**Öl- und Kühlmitteltemperatur**	60 - 80 °C
Kompressionsverhältnis	12,5	**Einspritzsystem und -druck**	PFI bis 6 bar

Mit A21 wird eine elektrische Leistung von 30 kW bei 4750 und 5000 1/min erzeugt. Durch die steigende Reibung bei höherer Drehzahl liegen die effizienten Punkte im Bereich niedrigerer Drehzahlen und bei ungedrosseltem Betrieb. Dabei wird ein effektiver Wirkungsgrad von über 32 % erreicht, mit einem indizierten Wirkungsgrad von 42 %.

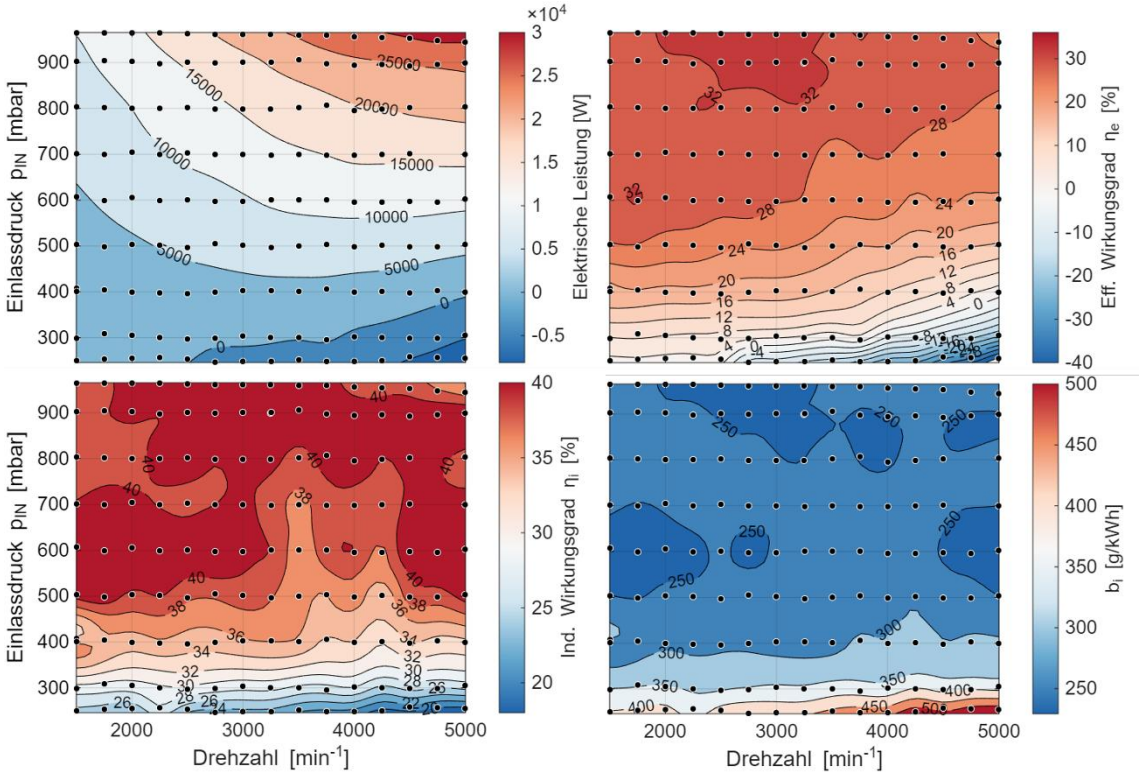

Abbildung 7 - A21 Kennfeld: Elektrische Leistung / η_e / η_i / b_i

Abbildung 8 zeigt den Verbrennungsschwerpunkt EU50 und den Mitteldruck für das fein gerasterte A21-Kennfeld. Bei einem Ansaugdruck von über 800 mbar muss die Zündung in Richtung Spät verschoben werden, um Klopfen zu vermeiden.

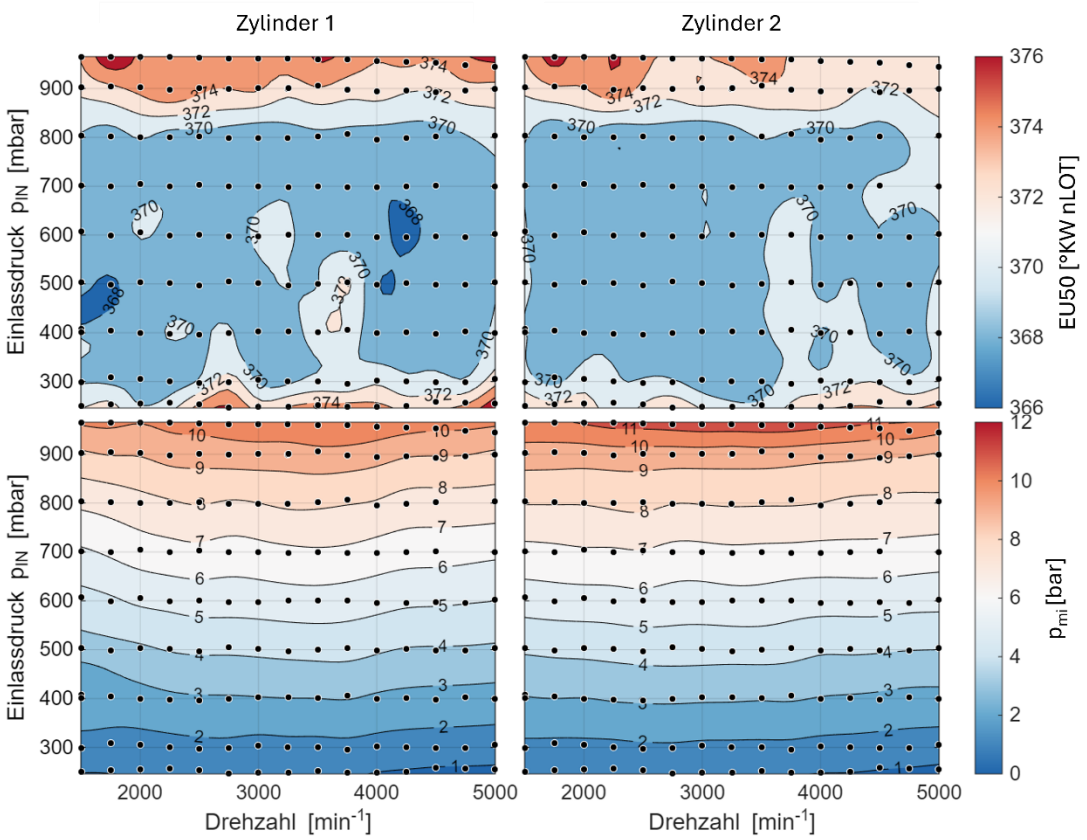

Abbildung 8 - A21 Kennfeld: EU50 und p_{mi} für beide Zylinder

Der indizierte Verbrauch in den effizientesten Punkten liegt unter 245 g/kWh. Da der Motor frei saugend im Prüfstand aufgebaut ist, hängt die maximale Last und Leistung unter anderem von der Umgebungstemperatur und Luftdruck ab. Bei einem Luftdruck in München von 935 – 955 mbar wird ein Mitteldruck von 11 – 12 bar erreicht, wobei der Mitteldruck in Zylinder 2 etwa 5 % höher liegt als in Zylinder 1. Die Verbrennungsstabilität liegt bei beiden Zylindern weitestgehend unter 3 %, was auf einen ruhigen Motorlauf und stabile Betriebspunkte hindeutet. Die Mitteldruckstandardabweichung bei Zylinder 2 ist im Niederlastbereich etwas höher als bei Zylinder 1. Der Grund dafür könnte eine schlechtere Gemischbildung sein. Die Mitteldruckstandardabweichungen sind in Abbildung 9 dargestellt. Verbrennungsinstabilitäten bei höheren Drehzahlen und niedrigem Ansaugdruck sind weniger relevant, da der Motor in diesen Bereichen einen sehr geringen oder sogar negativen Wirkungsgrad aufweist und der Betrieb dort nicht sinnvoll ist.

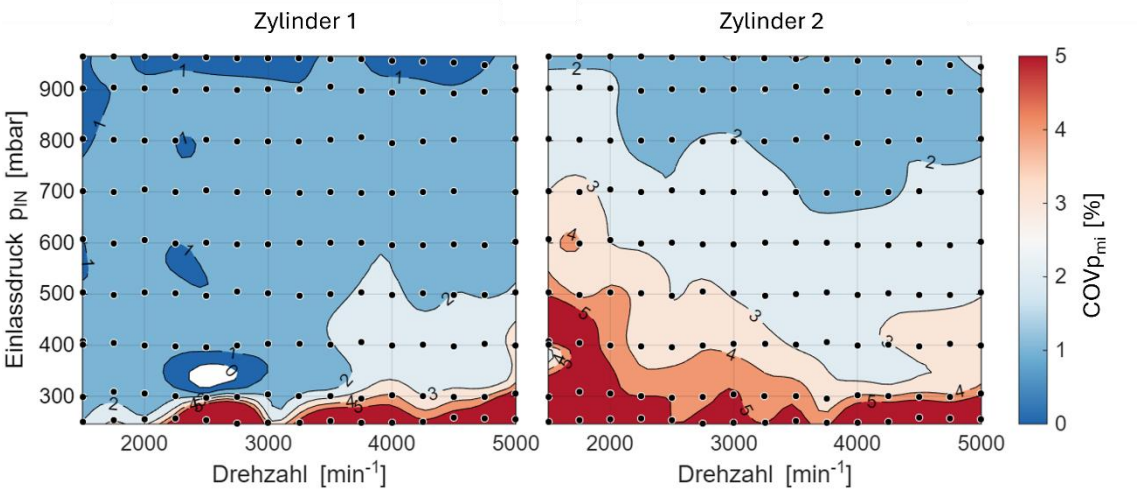

Abbildung 9 - A21 Kennfeld: COVp_{mi}

Die Rohemissionskonzentrationen für NO_x, CO und THC_{eq} sind in Abbildung 10 dargestellt. Stickoxidemissionen sind im Drehzahlbereich von 2000 bis 4000 1/min und bei einem Ansaugdruck von maximal 800 mbar. Bei höherer Last sinkt die Temperatur aufgrund der Spätverschiebung des Zündwinkels, wodurch weniger thermisches NO_x entsteht. Mit steigender Drehzahl steigt der CO-Anteil im Abgas; bei niedriger Drehzahl und bei höherer Last steigen hingegen die unverbrannten Kraftstoffanteile.

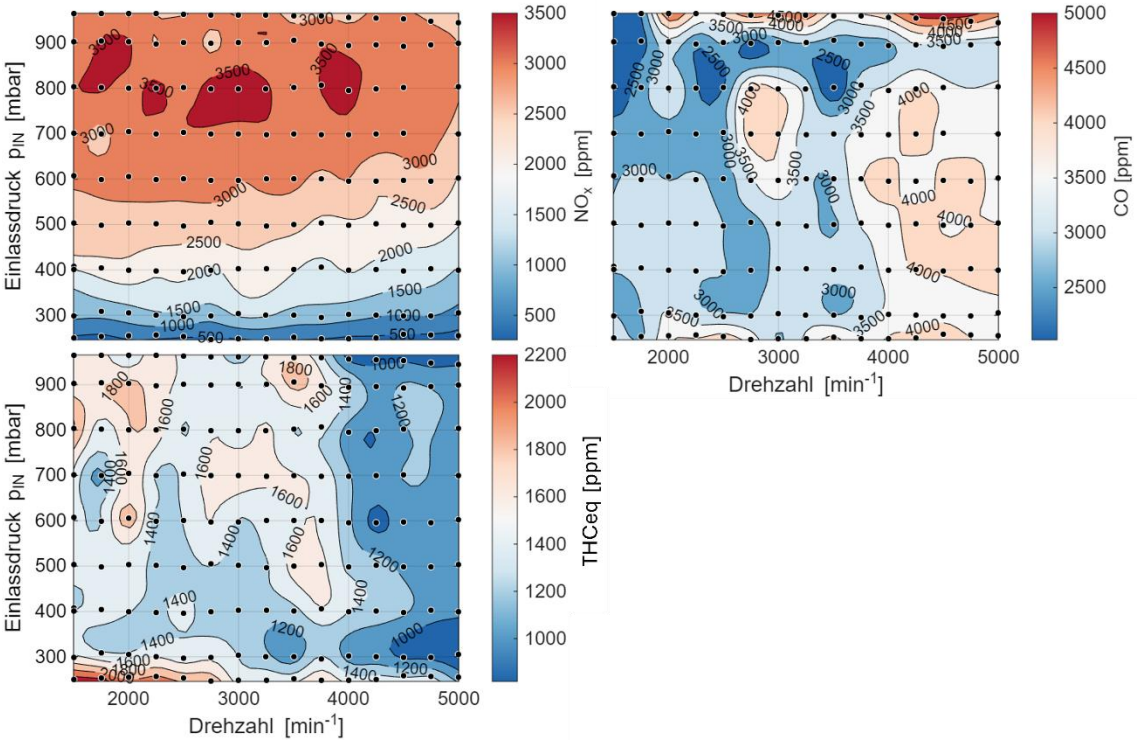

Abbildung 10 - A21 Kennfeld: NO_x, CO und THC_{eq}

Bei Verwendung von reinem Ethanol oder Methanol kann die Effizienz im Vergleich zu A21 und Benzin weiter gesteigert werden. In Abbildung 11 sind in der oberen Reihe die Leistungskennfelder für Methanol und Ethanol dargestellt. In der zweiten Reihe wird die Leistungsdifferenz zwischen A21 und den Alkoholen aufgezeigt. Dabei wird die Maximalleistung um über 4 kW gesteigert, was einer Steigerung um ca. 13 % entspricht.

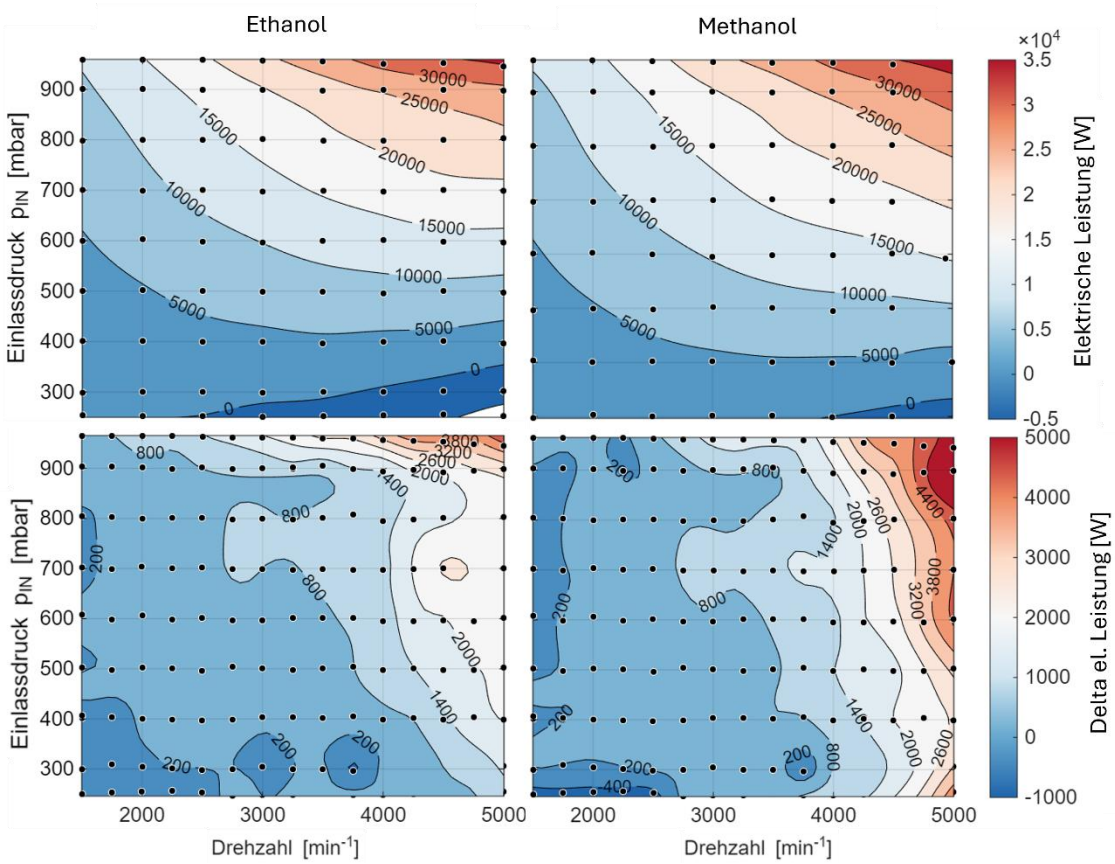

Abbildung 11 - Leistungssteigerung mit Ethanol und Methanol

2.1.4. Ungleichverteilung der Zylinderfüllung

Im Rahmen der thermodynamischen Messungen wurden signifikante Lambda-Schwankungen zwischen den einzelnen Zylindern festgestellt, die auf eine Ungleichverteilung der Zylinderfüllung hindeuten. Die Ursache liegt in der seitlichen Anströmung der Zylinder im Saugrohr: Durch die Strömungsverhältnisse wird der vom PFI-Injektor des ersten Zylinders eingebrachte Kraftstoff in Richtung des zweiten Zylinders verweht. Dies führt dazu, dass der zweite Zylinder ein deutlich fetteres Gemisch erhält als vorgesehen, wäh-

rend der erste Zylinder entsprechend abmagert. Diese Erkenntnis deckt sich mit vorangegangenen Motorschäden, die bevorzugt am betroffenen Zylinder auftraten und auf eine thermische Überlastung durch zu fettes Gemisch zurückzuführen sind.

Zur Quantifizierung der Ungleichverteilung wurde der Injection-Correction-Faktor variiert. Bei einem Korrekturfaktor von 1,4 – 1,5 konnte ein Gleichgewicht der Zylinderfüllungen erreicht werden, was das Ausmaß der kraftstoffseitigen Verschiebung zwischen den Zylindern verdeutlicht. In Abbildung 12 wird die Variation des Injection-Correction-Faktors dargestellt. Der Gleichgewichtspunkt lässt sich in der indizierten Leistung der Zylinder, der elektrischen Leistung und den Abgasemissionen deutlich erkennen. Diese experimentellen Befunde wurden durch eine CFD-Simulation der TU Dresden bestätigt, die die strömungsbedingte Verwehung des Kraftstoffs im Saugrohr detailliert abbildete. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde an der TU Dresden eine Hülse für den PFI-Injektor entworfen und simulativ validiert, die den Kraftstoffstrahl gezielt abschirmt und eine gleichmäßigere Verteilung auf die Zylinder gewährleisten soll. Die Fertigung dieser Hülse erfolgte anschließend am Lehrstuhl im 3D-Druckverfahren aus PA6CF, um eine schnelle Umsetzung und Erprobung am Prüfstand zu ermöglichen. Mit der verbauten Hülse wurde dieses Problem behoben.

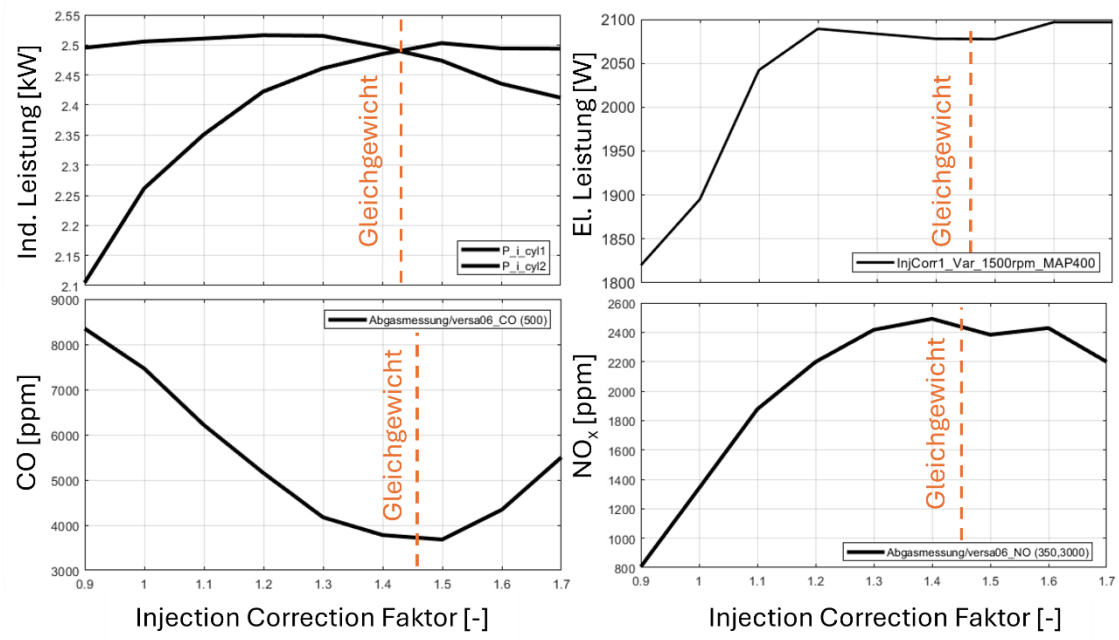

Abbildung 12 - Einfluss des Injection-Correction-Faktors

2.1.5. Katalysatorfunktion und Kraftstoff-Luft-Verhältnis

Messungen der Abgasemissionen nach dem Katalysator zeigten deutlich höhere Konzentrationen sämtlicher Bestandteile. Daher wurde ein Lambda-Sweep bei einem Einlassdruck von 900 mbar und einer Drehzahl von 1500 1/min mit Ethanol von 0,98 bis 1,02 durchgeführt. Abbildung 13 zeigt den Vergleich der NO_x- und CO-Emissionen vor und nach Kat. Dabei sind die Emissionen zum einen über dem ECU-Lambdawert und zum anderen über dem Lambdawert einer Nach-Kat-Sonde aufgetragen. Dabei ist ein leichter Shift von ca. 0,01 zwischen den Sonden zu erkennen. Infolgedessen führt ein stöchiometrisches Verhältnis gemäß ECU-Lambda nicht zu einer idealen Konvertierung der Abgase im Katalysator. Daher muss die eingespritzte Masse über das Kennfeld angepasst werden und eine Führungsregelung mit Lambdasonde nach Kat wäre empfehlenswert.

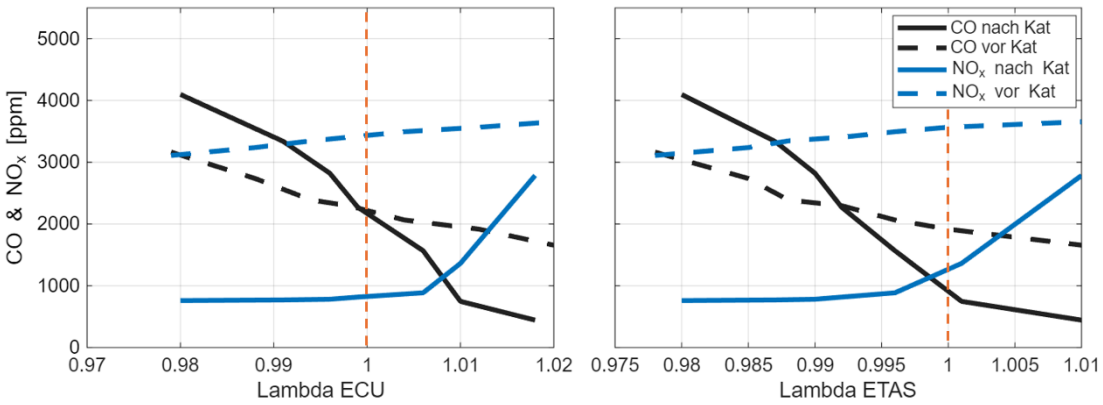

Abbildung 13 - Lambdavergleich vor/nach Kat anhand von NO_x und CO

Werden die Konzentrationsverhältnisse ins Verhältnis gesetzt, erreicht der Katalysator für Ethanol eine Konvertierungsrate von 95%, für CO und NOx ca. 60% im Bereich von Lambda = 1 nach der Nach-Kat-Sonde. Dies ist in Abbildung 14 für einen Lambdabereich von 0,98 bis 1,01 dargestellt. Aufgrund der niedrigen Konvertierungsraten lässt sich darauf schließen, dass nicht nur der Lambda-Offset, sondern auch der stark verbrauchte Katalysator zu den hohen Emissionskonzentrationen für.

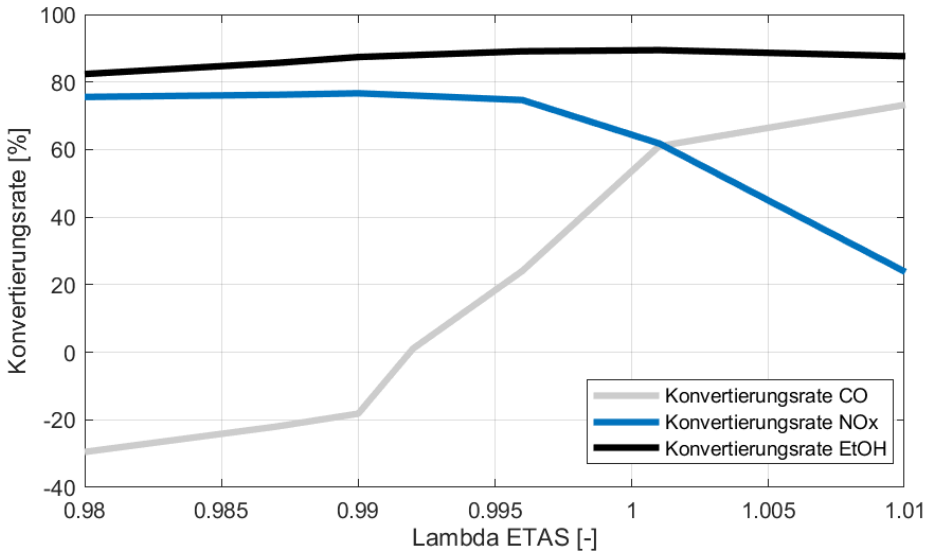

Abbildung 14 - Konvertierungsrate des Drei-Wege-Katalysators

Bei Betrachtung des kompletten Kennfeldes zeigt eine Last- und Drehzahlabhängigkeit des Lambda-Offsets und ist in Abbildung 15 dargestellt. Bei konstantem ECU-Lambda von 1,000 über das gesamte Kennfeld wird das Gemisch bei hoher Last und niedriger Drehzahl fett, bei niedriger Last und hoher Drehzahl hingegen mager.

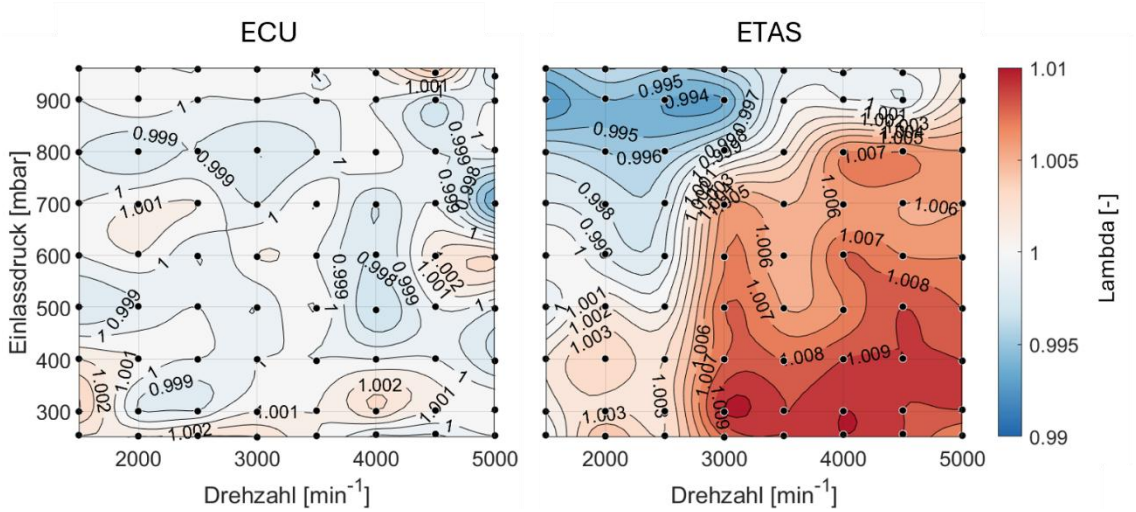

Abbildung 15 - Last- und Drehzahlabhängigkeit des Lambda-Offsets

Geringe Abweichungen vom stöchiometrischen Gemisch im Bereich von ±0,005 führen bereits zu einer signifikanten Verschlechterung der Konvertierungsrate und werden in Abbildung 16 dargestellt. Dabei werden Rohabgaskonzentrationen von CO und NOx mit

nach-Kat. Eine Anpassung des in der ECU hinterlegten Lambdakennfelds ist unerlässlich, um die Emissionsgrenzwerte zu erreichen.

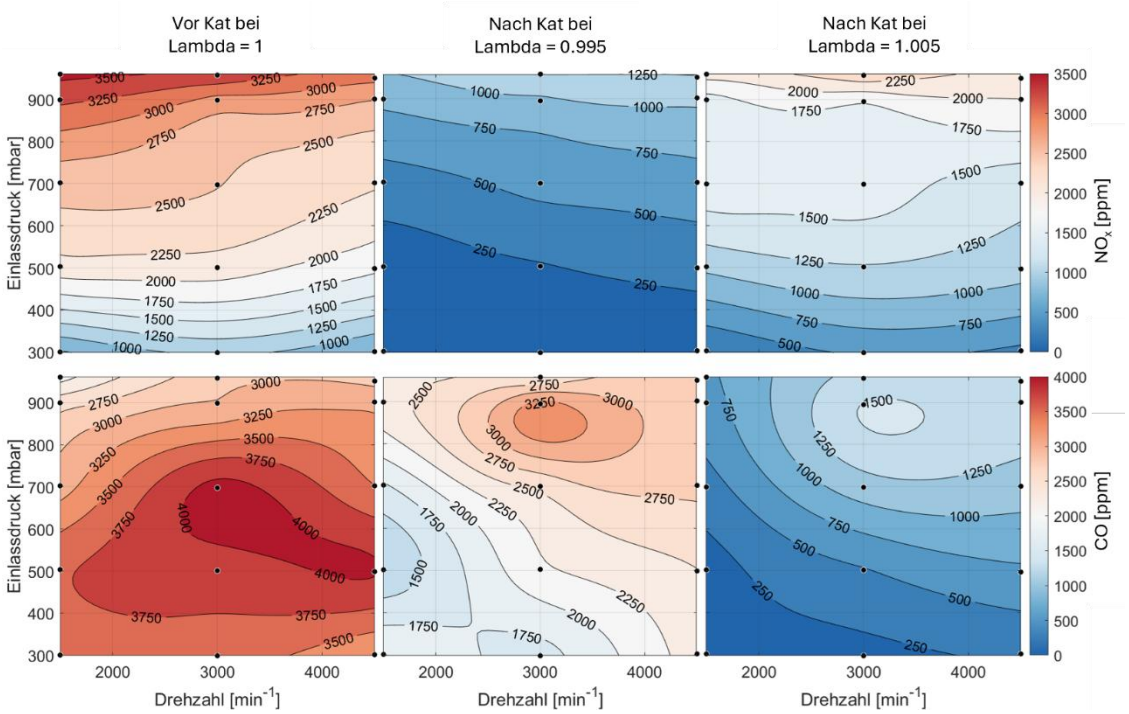

Abbildung 16- NOx und CO vor und nach Kat

2.1.6. Motorrevision

Der Motor wurde für Revisionen mehrfach zerlegt und überprüft. Das tribologische System zeigte dabei kaum Verschleiß. Die Hohnriefen an der Buchse waren immer erkennbar, und keine weiteren Defekte an Kolben oder Kolbenringen waren ersichtlich. Die Zahnflanken der Zahnräder für Generator, Kurbelwellen und Ölpumpen zeigten leichte Betriebsspuren, jedoch ohne signifikanten Materialabtrag, siehe Abbildung 17.

Abbildung 17 - Gleit- und Lagerflächen

Die Gleitsteine mit DLC-Beschichtung, die auf der Nockenwelle laufen, wurden im Zuge der zweiten Revision neu abgeschliffen und beschichtet und bei der dritten Revision

komplett erneuert. Die DLC-Beschichtung blätterte jeweils von den Gleitflächen ab, wie in Abbildung 18 dargestellt.

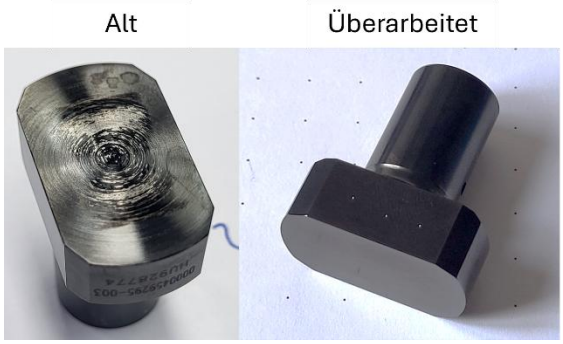

Abbildung 18 – Gleitsteine für Stößelstangen

Das auf einer der Kurbelwellen verbaute Miba-Zahnrad mit integriertem Gummipuffer erwies sich im Betrieb als nicht ausreichend belastbar. Im Rahmen der Prüfstandsuntersuchungen wurde ein Versagen der Schweißnaht zwischen dem seitlichen Stirnblech und dem Zahnradkörper in Form eines Ermüdungsrisses festgestellt. Darüber hinaus kam es zu einem Abscheren der Sicherungsschraubenköpfe, was auf eine unzulässig hohe zyklische Beanspruchung im Betrieb hindeutet. Die Schadensbilder lassen darauf schließen, dass die auftretenden dynamischen Lasten, hervorgerufen durch die Quetschung des Puffers, die Auslegungsgrenzen des Bauteils überschritten haben. Eine konstruktive Überarbeitung oder der Einsatz eines alternativ ausgelegten Zahnrads ist daher für den zuverlässigen Dauerbetrieb des Versuchsträgers erforderlich. Das Zahnrad mit Riss ist in Abbildung 19 dargestellt.

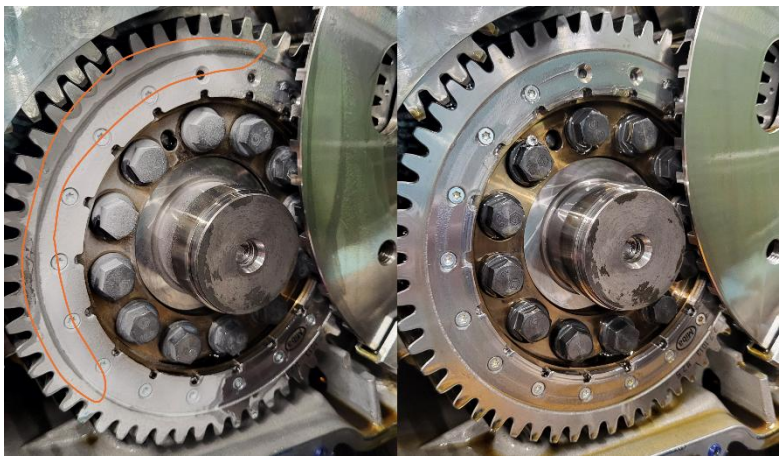

Abbildung 19 - Defektes Miba-Zahnrad

Zur Überwachung des Verschleißzustands und der Ölqualität wurden im Projektverlauf regelmäßig Ölproben entnommen und zur laboranalytischen Untersuchung eingeschickt. Die Ergebnisse zeigten über weite Strecken keine signifikanten Auffälligkeiten hinsichtlich des metallischen Abriebs oder der Degradation des Schmierstoffs. Lediglich ein erhöhter Siliziumgehalt, der auf den Eintrag von Dichtmasse in den Ölkreislauf zurückzuführen ist, sowie eine zunehmende Kraftstoffverdünnung des Öls wurden festgestellt.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In Tabelle 4 sind die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises inklusive der laut Projektantrag bzw. Zuwendungsbescheid geplanten und der tatsächlich angefallenen Kosten aufgelistet.

Tabelle 4 - Übersicht der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sowie Vergleich der Kostenplanung gemäß Projektantrag mit den tatsächlich angefallenen Kosten

Position		Geplante Kosten (laut Zuw.Besch.)	Tatsächlich angefallene Kosten
Personalausgaben:			
Beschäftigte E12 – E15		283.791,00 €	291.567,19 €
Beschäftigungsentgelte		56.094,24 €	57.535,33 €
Summe Personalausgaben		**339.885,24 €**	**349.102,52 €**
Sächliche Verwaltungsausgaben:			
Sonst. allg. Verwaltungsausgaben		54.888,71 €	52.742,16 €
Dienstreisen		4.791,00 €	3.452,80 €
Summe Sächliche Verwaltungsausgaben		**59.679,71 €**	**56.194,96 €**
Gegenstände und andere Investitionen:			
1	Energieversorgungsmodul Batteriesimulator	171.776,50 €	169.038.76 €
Summe Gegenstände und Investitionen		171.776,50 **€**	169.038.76 **€**

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Projekt wurde großer Aufwand in die Applikation der Motorsteuerung des Prototypenmotors, in die Entwicklung und den Aufbau der Hochvolt-, Kraftstoff- und Indiziersysteme sowie in die Kennfeldvermessung und Abgasemissionierung investiert, um die Verbrennung der Kraftstoffe unter realitätsnahen Bedingungen untersuchen zu können. Ein Doktorand war mit diesen Aufgaben sowie mit der Durchführung und Auswertung der thermodynamischen Untersuchungen beschäftigt. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen ermöglichen ein sehr gutes Verständnis der Einflüsse von ECU-Bedatung auf Leistung, Emissionen und Auswahl der Betriebsstrategie, das ohne diesen Aufwand nicht erreicht worden wäre.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Ein wesentlicher Aspekt des Verwertungsplans von TUM-NMA ist, dass die Ausbildung der Studenten durch den Kontakt zu aktuellen Forschungsthemen profitiert. Dies ist zum einen durch die Einbindung von Studenten in die praktische Projektarbeit im Rahmen von Studienarbeiten bzw. Beschäftigung als studentische Hilfskraft erfolgt, wodurch diese experimentelle und simulative Methoden zur Entwicklung von verbrauchs- und emissionsarmen Hybridmotoren erlernen konnten. Außerdem werden Ergebnisse des Projekts Carbon2Chem in die Vorlesungsinhalte des Lehrstuhls eingebunden. Die am Hybridmotor mit nachhaltigen Kraftstoffen gewonnenen Kennfelddaten eignen sich beispielsweise hervorragend, um das Verhalten verschiedener Betriebsstrategien in den Vorlesungen des Lehrstuhls anschaulich zu vermitteln.

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Erfolgte Veröffentlichungen

Fitz, P., Fellner, F., Rößlhuemer, R., Härtl, M. et al., "Alcohol-Based Energy Carriers in Transportation: Status, Standards, and Outlook," SAE Technical Paper 2026-37-0042, 2026.

Under Review:

-

Geplante Veröffentlichungen:

-

3. Literatur

[1] IEA, "Global Energy Review 2025," Paris, 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025

[2] M. Crippa *et al.* "GHG emissions of all world countries – JRC/IEA 2025 Report." Zugriff am: 30. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://data.europa.eu/doi/10.2760/9816914

[3] M. Filonchyk, M. P. Peterson, L. Zhang, V. Hurynovich und Y. He, "Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO2, CH4, and N2O," *The Science of the total environment*, Early Access. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173359.

[4] S. Verhelst, J. W. G. Turner, L. Sileghem und J. Vancoillie, "Methanol as a fuel for internal combustion engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, Jg. 70, S. 43–88, 2019, doi: 10.1016/j.pecs.2018.10.001.

[5] F. Schorn *et al.,* "Methanol as a renewable energy carrier: An assessment of production and transportation costs for selected global locations," *Advances in Applied Energy*, Jg. 3, S. 100050, 2021, doi: 10.1016/j.adapen.2021.100050.

[6] IRENA and Methanol Institute. "Innovation Outlook: Renewable Methanol." Zugriff am: 2. April 2026. [Online.] Verfügbar: https://methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf

[7] N. Badger und S. Amini, "Comparative life cycle assessment of various hydrogen pathways for cleaner methanol synthesis," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 533, S. 146993, 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.146993.

[8] M. Prussi, M. Yugo, L. de Prada, M. Padella und R. Edwards. "JEC Well-To-Wheels report v5: EUR 30284 EN."

[9] J. W. G. Turner *et al.,* "Alcohol fuels for spark-ignition engines: Performance, efficiency and emission effects at mid to high blend rates for binary mixtures and pure components," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Jg. 232, Nr. 1, S. 36–56, 2018, doi: 10.1177/0954407017752832.

[10] J. W. G. Turner *et al.,* "Alcohol Fuels for Spark-Ignition Engines: Performance, Efficiency, and Emission Effects at Mid to High Blend Rates for Ternary Mixtures," *Energies*, Jg. 13, Nr. 23, S. 6390, 2020, doi: 10.3390/en13236390.

[11] C. Wouters, P. Burkardt, F. Steeger, M. Fleischmann und S. Pischinger, "Comprehensive assessment of methanol as an alternative fuel for spark-ignition engines," *Fuel*, Jg. 340, S. 127627, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.127627.

[12] C. Kraus *et al.,* "Highly Efficient and Clean Combustion Engine for Synthetic Fuels," in *SAE Technical Paper Series*, Detroit, Michigan, United States, C. Kraus et al., Hg., 2023, doi: 10.4271/2023-01-0223.

[13] T. Wallner, "Correlation Between Speciated Hydrocarbon Emissions and Flame Ionization Detector Response for Gasoline/Alcohol Blends," in *ASME 2010 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, San Antonio, Texas, USA, 2010, S. 119–128, doi: 10.1115/ICEF2010-35031.

[14] J. T. Scanlon und D. E. Willis, "Calculation of Flame Ionization Detector Relative Response Factors Using the Effective Carbon Number Concept," *Journal of Chromatographic Science*, Jg. 23, Nr. 8, S. 333–340, 1985, doi: 10.1093/chromsci/23.8.333.

[15] S. Blochum *et al.,* "Comparison of Promising Sustainable C1-Fuels Methanol, Dimethyl Carbonate, and Methyl Formate in a DISI Single-Cylinder Light Vehicle Gasoline Engine," in *SAE Technical Paper Series*, Live Online, Pennsylvania, United States, S. Blochum et al., Hg., 2021, doi: 10.4271/2021-01-1204.

[16] F. Atzler, R. Werner und M. Dobberkau, "Methanol cold start procedure for a serial hybrid powertrain," *Automot. Engine Technol.*, Jg. 10, Nr. 1, 2025, doi: 10.1007/s41104-025-00156-8.

[17] P. Fitz, F. Fellner, R. Rößlhuemer, M. Härtl und M. Jaensch, "Dual Injection Concept and Lean Burn Characteristics with Methanol on a SI-Engine," in *SAE Technical Paper Series*, Catania, Italy, P. Fitz, F. Fellner, R. Rößlhuemer, M. Härtl und M. Jaensch, Hg., 2024, doi: 10.4271/2024-24-0030.

A. Erfolgskontrollbericht