



Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe

ABSCHLUSSBERICHT

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Vorwort

AUTOR*INNEN

ISABEL KUNDLER

PHILIP RUFF

Aus Erdöl hergestellte Kraftstoffe, wie Diesel, Benzin oder Kerosin bilden heute noch das Rückgrat der Energieversorgung des Verkehrssektors. Sowohl im Personenverkehr als auch im Gütertransport dominieren fossile Energieträger den Markt. An Land, zu Wasser und in der Luft. Der Anteil erneuerbarer Energien am Verbrauch liegt dabei i.d.R. im einstelligen Prozentbereich – in Deutschland derzeit bei etwa 7 % (davon 63,3 % Biodiesel, 21,3 % Bioethanol, 12,9 % Strom, 2,5 % Biomethan). Das entspricht etwa 39,4 TWh¹ jährlich.

Der Versorgung mit fossilen Energieträgern liegt ein globales Netzwerk aus Handels- und Wertschöpfungsketten zugrunde, das in den vergangenen Jahrzehnten zunehmend intensiviert und optimiert wurde. Im Zuge der Transformation in eine klimaneutrale Energieversorgung muss man davon ausgehen, dass eine Industrienation wie Deutschland weiterhin auf Energieimporte angewiesen sein wird. Daher wird angenommen, dass neben dem dringend erforderlichen Ausbau der Erneuerbaren und dem Trend zur direkten Elektrifizierung energieintensiver Prozesse auch chemische Energieträger eine wesentliche Rolle spielen. Letztere sind speicherbar, transportierbar und lassen sich in vorhandene Infrastrukturen integrieren.

Um dem entgegenzuwirken, muss zukünftig darauf hingearbeitet werden, eine gleichermaßen defossilisierte, nachhaltige, wie auch resiliente Energieversorgung, nicht nur im Verkehrssektor, aufzubauen. Dazu haben sich viele Staaten und Staatenverbünde verbindliche Ziele zur weitgehenden Klimaneutralität bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts gesetzt.

Da der Verkehrssektor hier insbesondere durch das kontinuierlich zunehmende Verkehrsaufkommen in den vergangenen Jahren wenig Fortschritte machte, werden dringend alternative Antriebstechnologien und grüne Energieträger hierfür benötigt. Vor allem im Individualverkehr scheint sich derzeit die zunehmende Elektromobilität durchzusetzen – Dank massiver politischer und finanzieller Anreize. Länder wie Norwegen nehmen dabei eine Vorreiterrolle ein. In anderen Ländern, wie auch in Deutschland, stehen Verzögerungen beim Aufbau der notwendigen Ladeinfrastruktur und der hohe Anschaffungspreis dem Markthochlauf teilweise noch entgegen. Nicht unumstritten ist im Kontext der Elektromobilität zudem die Verfügbarkeit und der Abbau kritischer Rohstoffe für die Batterietechnologie, namentlich Lithium und Kobalt.

¹ Quelle: Werte für 2021, Umweltbundesamt auf Basis AGEE-Stat, Stand 03/2022

Grundsätzlich besteht die Tendenz, dass mit zunehmender Masse und steigender Distanz die Batterietechnologie im Vergleich zu chemischen Energieträgern nachteilig wirkt. So erscheint zum Beispiel im Bereich des straßengebundenen Güterverkehrs und der Nutzfahrzeuge die Batterietechnologie nicht zwangsläufig als erstes Mittel der Wahl. Parallel wird hier an alternativen Antrieben wie Brennstoffzelle, Wasserstoffmotor und synthetischen Kraftstoffen geforscht und entwickelt. Noch weiter oben auf dieser Skala, bei Flugverkehr und Schifffahrt, sind flüssige und/oder gasförmige Energieträger aufgrund ihrer hohen Energiedichte alternativlos. Zusätzlich wird man auch abseits des Transportwesens im Off-Highway-Bereich, z.B. bei Bau- und Landwirtschaftsmaschinen, mobilen Arbeitsmaschinen und stationären Großmotoren, perspektivisch auf chemische Energieträger angewiesen sein – jedoch müssen sie nachhaltig und so CO₂-neutral wie möglich werden.

Dafür werden sogenannte Power-to-X-Technologien benötigt, die erneuerbaren Strom (Wind, Photovoltaik) in großem Maßstab durch Umwandlung in flüssige bzw. gasförmige Energieträger speicherbar, transportierbar und jederzeit verfügbar machen. Zunächst wird dazu mit grünem Strom Wasserstoff mittels Elektrolyse aus Wasser hergestellt. Anschließend wird dieser mit CO₂, z.B. direkt aus der Luft, industriellen Punktquellen oder biogenen Ursprungs, zu chemischen Energieträgern veredelt. Hierbei geht zwar ein Teil der Energie verloren, die Energie kann so aber sehr gut über lange Strecken transportiert, verlustfrei über Wochen, Monate, Jahre gespeichert werden und steht genau dann zur Verfügung, wenn sie gebraucht wird – unabhängig von Sonne und Wind. Insbesondere für Länder wie Deutschland, die auch zukünftig auf Energieimporte angewiesen sein werden, sind strategische Energiepartnerschaften unerlässlich, um die Energieversorgung über den Import von Power-to-X-Produkten zu sichern und neue Wertschöpfungsketten zu etablieren.

Um diese Technologien bis zur Marktreife zu entwickeln, werden verschiedene Forschungsprogramme z.B. durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) oder das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Erwähnenswert sind hier u.a. das Projekt NAMOSYN, die Kopernikus-Projekte und die Wasserstoff-Leitprojekte des BMBF, sowie die Förderinitiative »Energiewende im Verkehr« des BMWK.

Autor*innen



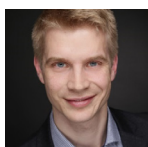
Sandra Adelung studierte bis 2015 an der Universität Stuttgart Verfahrenstechnik. Seit Mai 2015 forscht sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt an verschiedenen Arbeitsschwerpunkten. In den ersten Jahren untersuchte sie schwerpunktmäßig die reverse Wassergas-Shift Reaktion. Seit vier Jahren widmet sie sich der techno-ökonomische Prozessanalyse von Herstellungsverfahren zur Erzeugung von alternativen Kraftstoffen.



Dr.-Ing. Ramy E. Ali hat Chemieingenieurwesen studiert und sein Masterstudium in erneuerbaren Energien im Jahr 2014 absolviert. 2015 – 2019 promovierte er am Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik an der TU-Dortmund. Zurzeit arbeitet er als Wissenschaftler am Fraunhofer ISE an der Entwicklung neuer Wasserstofftechnologien für eine nachhaltige Energieversorgung sowie an der techno-ökonomischen Bewertung von Prozesskonzepten.



Dr. Ulrich Arnold leitet am Institut für Katalysatorforschung und -technologie (IKFT) des KIT die Arbeitsgruppe »Katalyse und Prozesse für nachhaltige Kraftstoffe«. Aktuelle Schwerpunkte sind die katalytische Herstellung modifizierter OME, paraffinischer Kraftstoffe und von Zwischenprodukten der chemischen Industrie aus Methanol und Dimethylether.



Dr. Jens Artz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich »Energie und Klima« der Forschungs- und Projektkoordination des DECHEMA e.V.. Als Senior Advisor E-Fuels & E-Chemicals betreut er derzeit verschiedene (inter)nationale Projekte mit Schwerpunkt auf Wasserstoff und Power-to-X-Produkten, darunter auch NAMOSYN und NormAKraft – Normkonformität alternativer Kraftstoffe.



M.Sc. Visheet Arya hat einen Master in Materialwissenschaften und ist seit 2019 Doktorand am MPA-IfW, Bereich Oberflächentechnik (Maschinenbau TU Darmstadt). Primärer Forschungsschwerpunkt umfasst die Analyse von Korrosionsmechanismen und daraus resultierender Materialkompatibilität in künftigen Kraftstoffen (Oxygenaten).



Dr. Chalachew M. Asmelash ist an der RWTH Aachen Gruppenleiter am Lehrstuhl für Heterogene Katalyse und Technische Chemie von Frau Prof. Palkovits. Er beschäftigt sich mit Entwicklung von heterogenen Katalysatoren für Hochtemperatur-Gasphasenprozesse zur Synthese von Kraftstoffen und Chemikalien aus CO₂ und anderen C1-Bausteinen.



Prof. Dr. techn. Christian Beidl ist Leiter des Fachgebiets Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe an der TU Darmstadt. Sein Team untersucht u. a. die Verbrennung sowie die Abgascharakterisierung des synthetischen Dieselmotors OME mit dem Fokus der Effizienzsteigerung und der Emissionsminderung. Als Versuchsträger werden ein Einzylinderforschungsmotor, Serienmotoren aus dem PKW- und Off-Highway Bereich sowie ein PKW-Demonstratorfahrzeug eingesetzt.



Dr.-Ing. Benjamin Böhm ist Forschungsgruppenleiter im Bereich Angewandte Thermochemische Energiekonverter am Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik an der TU Darmstadt.



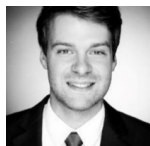
Dr.-Ing. Dominik Bongartz ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik (AVT.SVT) der RWTH Aachen University und ab Herbst 2022 Assistant Professor an der KU Leuven. Seine Arbeitsschwerpunkte sind die Entwicklung von Power-to-X-Prozessen sowie Optimierungsmethoden für die Prozessentwicklung.



Prof. Dr.-Ing. Jakob Burger ist Professor für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik an der Technischen Universität München. Er entwickelt seit 2007 mit zahlreichen Partnern neue Verfahren zur Herstellung von OME.



Dr. G. Wilma Busser arbeitet als Postdoktorandin am Lehrstuhl für Technische Chemie der Ruhr-Universität Bochum unter der Leitung von Prof. Dr. Martin Muhler. Sie bearbeitet Projekte im Bereich der heterogenen Redox-Katalyse in der Gas- und Flüssigphase und im Bereich der Photokatalyse.



Dr.-Ing. Jannik Burre studierte Maschinenbau und Verfahrenstechnik an der RWTH Aachen University. 2017 hat er sein Promotionsstudium bei der Systemverfahrenstechnik (AVT.SVT) in Aachen mit dem Schwerpunkt der Prozessentwicklung für synthetische Kraftstoffe begonnen und 2022 abgeschlossen.



Ankur Ghosh Chowdhury absolvierte sein Bachelorstudium in Chemieingenieurwesen in Indien und das Masterstudium an der Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg. Seit 2019 bearbeitet er das Thema »Herstellung von trockenem Formaldehyd durch die Dehydrierung von Methanol« im Rahmen seiner Doktorarbeit bei Prof. Jörg Sauer am Institut für Katalysatorforschung und -technologie (IKFT) des KIT.



M.Sc. Philipp Demel ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe an der TU Darmstadt im Bereich der experimentellen Untersuchung und Bewertung von synthetischen Kraftstoffen.



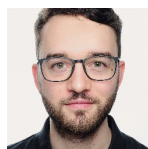
Dr.-Ing. Ralph-Uwe Dietrich leitet die Arbeitsgruppe Techno-ökonomische Analyse am Institut für Technische Thermodynamik am DLR. Er beschäftigt sich mit der Erzeugung alternativer Kraftstoffe und der Dekarbonisierung von Industrieprozessen. Sein Forschungsschwerpunkt sind Methoden der technischen, ökonomischen und ökologischen Bewertung von technischen Prozessen für die Umsetzung von CO₂ bzw. Biomasse und die Herstellung von synthetischen Energieträgern, Kraftstoffen und Grundchemikalien.



Prof. Dr. habil. Andreas Dreizler ist Leiter des Fachgebiets Reaktive Strömungen und Messtechnik an der TU Darmstadt. Sein Team untersucht u. a. die Suppression der Rußbildung und -oxidation mit OME substituiertem Dieselmotorkraftstoff unter Variation von Strömungsgeschwindigkeiten und Äquivalenzverhältnissen. Dabei kommen als Versuchsaufbauten generische Brennersysteme zum Einsatz, um die Komplexität der turbulenten OME-Verbrennung unter Verwendung von Laserdiagnostik zu charakterisieren.



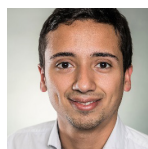
Fabian Eichner studierte Verfahrenstechnik an den Hochschulen Offenburg und Bremerhaven. Seit 2019 promoviert er am KIT-IKFT in der Arbeitsgruppe von Prof. Jörg Sauer im Themenfeld der heterogen katalysierten Dehydrierung von Methanol zu Formaldehyd.



Marius Drexler studierte Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik am KIT. Seit 2019 promoviert er am Institut für Katalysatorforschung und -technologie (IKFT) im Arbeitskreis von Prof. Jörg Sauer. Seine Arbeit konzentriert sich auf die effiziente Synthese von OME aus DME in einem kontinuierlichen Prozess.



Dr.-Ing. Federica Ferraro ist Gruppenleiterin im Bereich Mehrdimensionale Simulation chemisch-reaktiver Strömungen am Fachgebiet für Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme an der TU Darmstadt.



Alvaro Ferre ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik an der Technischen Universität München. Er beschäftigt sich im Rahmen seiner Dissertation mit der Skalierung von OME-Verfahren vom Labor in die industrielle Praxis.



Niklas Gebel ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitskreis von Prof. Dr. Ingo Krossing am IAAC der Universität Freiburg. Beginnend mit seiner Masterarbeit beschäftigt er sich während seiner Promotion mit der Vereinheitlichung von pH-Werten in unterschiedlichen Lösungsmitteln (PPM). Im Projekt NAMOSYN war er mit der Stabilisierung der Kraftstoffblends betraut.



Sanket Girhe ist seit 2021 am ITV (RWTH Aachen) in der Gruppe Verbrennungsschemie tätig. Er schloss sein Bachelor- und Masterstudium am IIT Kharagpur, Indien, ab und arbeitete vor seiner jetzigen Position bei Daimler Trucks Asia, Japan. Im Rahmen des Projekts arbeitete er an der Entwicklung der chemisch-kinetischen Mechanismen von DMC und MeFo.



Tobias Goral ist Entwicklungsingenieur bei Analytik-Service AG und seit 2018 mit der Forschung an alternativen Kraftstoffen beschäftigt. Sowohl im Rahmen seiner Bachelor-, als auch seiner Masterarbeit befasste er sich bereits mit den Herausforderungen eines Oxygenatkraftstoffs. Im Forschungsprojekt war er für die Untersuchung der Blendstabilität verantwortlich.



Prof. Dr.-Ing. Andreas Jupke leitet den Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik der RWTH Aachen University. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Entwicklung von Aufreinigungsstrategien für biotechnologische Produkte und innovativen Ansätzen zur Intensivierung von Extraktionsprozessen sowie der modellbasierten Apparateauslegung.



Dr.-Ing. Michael Haas war Anschluss an seine Promotion im Fachbereich Chemie der Technischen Universität Darmstadt als Post-Doc am Aufbau, der Inbetriebnahme sowie der Koordination des im Rahmen des NAMOSYN-Projektes entwickelten und aufgebauten dynamischen Laborprüfstandes zur Untersuchung von Katalysatorsystemen zur Abgasnachbehandlung beteiligt. In seiner aktuellen Position bei Umicore Automotive Catalysts hat er bei der Entwicklung und Testung der für den OME-Betrieb optimierten Katalysatoren zur Niedrigtemperatur-Oxidation von CO mitgewirkt.



Christoph Kabatnik ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik der RWTH Aachen University. Er beschäftigt sich mit der Umsetzung von CO₂ in mehrphasigen Reaktionssystemen.



Marta Kamienowska beschäftigt sich am Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES) des KIT mit dem Thema der direkten Dehydrierung von Methanol zu Formaldehyd mit Natriumdampf als Katalysator.



Dr.-Ing. habil. Martin Härtl ist seit 2015 Oberingenieur an der Technische Universität München und war Clusterleiter des Forschungsprojekts im Bereich ottomotorischer syn. Kraftstoffe. Er beschäftigte sich sowohl in seiner Dissertation als auch in seiner kürzlich erfolgten Habilitation eingehend mit der Erforschung und Analyse emissionsfreier Mobilität und der damit verknüpften Energiewende.



Chandra Kanth Kosuru ist Projektleiter bei der Tec4Fuels GmbH und arbeitet seit 2015 an der Forschung im Bereich der Fluid-Condition-Monitoring einschließlich flüssiger Kraftstoffe, alternativer Kraftstoffe und Kühlfüssigkeiten, sowie der Kompatibilität von Kraftstoffen mit Materialien und der Interaktion mit Kraftstoffeinspritzkomponenten. Im Projekt NAMOSYN befasst er sich mit dem Thema der Wechselwirkung von Kraftstoffeinspritzkomponenten mit DMC-MeFo.



Prof. Dr.-Ing. Christian Hasse ist Leiter des Fachgebiets für Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme an der TU Darmstadt. Sein Team untersucht u. a. die Verbrennung sowie Rußbildung in OME-Flammen und verwendet hierbei numerische Ansätze wie beispielsweise verschiedene statistische Rußmodelle aus der Familie der Quadrature-based Moment Methods (QbMM) in Kombination mit detaillierter Chemie.



Prof. Jürgen Klankermayer ist seit 2009 Professor an der RWTH Aachen University und führt den Lehrstuhl für Translationale Molekulare Katalyse. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Entwicklung neuer Katalysatoren und Reaktionskonzepte für die Umsetzung und Aufwertung von Biomasse, katalytische Nutzbarmachung von CO₂ als C₁ Quelle, molekulare Systeme für chemische Hydrierungen, katalytische Recycling von Polymeren und Untersuchungen von chiralen frustrierten Lewis-Paaren.



Jan Hildebrand leitet seit 2016 das Arbeitsfeld Umweltpsychologie am Institut für Zukunftsenergie- und Stromsysteme (IZES) in Saarbrücken. Zu seinen Forschungsschwerpunkten zählen Akzeptanz- und Partizipationsforschung im Bereich erneuerbarer Energieinfrastrukturen, psychologische Faktoren der Energienutzung, nachhaltige Mobilität, Prozessbegleitung bei Beteiligungs- und Konsultationsverfahren sowie Konfliktmoderation.



M.Sc. Friedemar Knost ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe an der TU Darmstadt im Bereich der experimentellen Untersuchung und Bewertung von synthetischen Kraftstoffen.



Daniel Koch arbeitete bei der AUDI AG bis Mai 2022 in der Vorentwicklung R4-Ottomotoren am Standort Ingolstadt. Im Rahmen des NAMOSYN-Projekts war er u. a. für die Koordination und Bereitstellung von Versuchsmotoren und Ersatzteilen zuständig sowie für die Betreuung experimenteller Untersuchungen zu Thermodynamik und Brennverfahren am Otto-Vierzylinder-Vollmotor in Zusammenarbeit mit Fa. Tenneco.



Franz Mantei hat an der Technischen Universität Berlin Energie- und Verfahrenstechnik studiert. 2018 hat er seine Promotion an der Technischen Universität Berlin und dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE mit einem Stipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU begonnen. Seine Forschung fokussiert sich auf die Prozessentwicklung, -simulation und -validierung zur Herstellung von Oxymethylenethern (OME).



Christoph Kraus ist seit 2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU München und bearbeitete die Arbeitspakete am Einzylinderforschungsmotor. Durch sein Maschinenwesen-Studium an der TUM war er bereits seit 2017 am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen tätig. Er konnte so beginnend mit seiner Bachelorarbeit, über die Tätigkeit als »HIWI« und seiner Masterarbeit notwendiges Vorwissen sammeln.



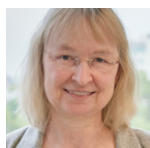
Mariia Merko studierte Chemie an der Nationalen W.-N.-Karasin-Universität Charkiw, Ukraine und an der Ruhr-Universität Bochum. Seit 2019 promoviert sie im Arbeitskreis von Prof. M. Muhler zum Thema der heterogen katalysierten Dehydrierung von Methanol zu Formaldehyd.



Prof. Dr. Ingo Krossing ist am Institut für anorganische und analytische Chemie der Albert-Ludwigs-Universität und am Freiburger Materialforschungszentrum als Projektgruppenleiter für ionische Systeme und u.a. deren Anwendung in nachhaltiger Katalyse tätig. Als Promovierende im NAMOSYN-Cluster 1B waren **Dr. Andreas Peter**, **Andreas Billion** und **Dustin Kubas** beteiligt.



Prof. Alexander Mitsos, Ph.D. ist seit 2012 Professor für Systemverfahrenstechnik an der RWTH Aachen und seit 2017 Direktor des IEK-10 am Forschungszentrum Jülich. Seine Forschungsschwerpunkte sind einerseits optimale Entwicklung und Führung von chemischen & biotechnologischen Prozessen und Energiesystemen und andererseits Theorie und Algorithmen für deterministische globale Optimierung. Dazu werden Methoden aus Data Science und Machine Learning eingesetzt und weiterentwickelt.



Dr. Isabel Kundler ist Koordinatorin des Projekts NAMOSYN. Sie hat an der Universität Freiburg Chemie studiert und mit Schwerpunkt »Makromolekulare Chemie« promoviert. Anschließend hat sie in der chemischen Industrie und in der Zulieferindustrie für Brennstoffzellen-Komponenten Forschungsprojekte koordiniert und als Manager Technical Marketing Kunden durch anwendungstechnische Beratung unterstützt. Seit 2018 arbeitet sie in der DECHEMA im Fachbereich Energie und Klima federführend in Projekten, in denen Technologien für Wasserstoff, grünes Methanol und dessen Folgeprodukte entwickelt werden.



Prof. Dr. Martin Muhler ist Professor an der Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Chemie und Biochemie, Lehrstuhl für Technische Chemie. Seine Forschungsthemen liegen im Bereich der heterogenen Redox-Katalyse und umfassen die selektive Reduktion und Oxidation, die Elektrokatalyse und die Photokatalyse.



Dr.-Ing. Klarissa Niedermeier arbeitet als Postdoktorandin am Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES) des KIT. Sie leitet Projekte im Bereich der Hochtemperatur-Prozesstechnik und thermischen Energiespeicherung.



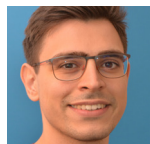
Luisa López hat Chemieingenieurwesen in Bogotá und Erlangen studiert. Sie arbeitet als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachbereich Energie und Klima bei der DECHEMA e.V. in nationalen und internationalen Power-to-X-Projekten. Ihr Schwerpunkt liegt auf Potenzialanalysen und Technologie-Optionen für die chemische Industrie.



Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner ist Leiter des Fachgebiets für Werkstoffkunde und der Staatlichen Materialprüfanstalt (MPA-IfW) an der TU Darmstadt.



Dr. Ole Osterthun ist Gruppenleiter am Lehrstuhl für Translationale Molekulare Katalyse von Herrn Prof. Klankermayer. Er beschäftigt sich mit experimentellen und quantenchemischen Untersuchungen von Katalysatoren, die in der Aktivierung und Nutzung von erneuerbaren C_1 -Quellen eingesetzt werden.



Daniel Rezo hat an der RWTH Aachen Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Energietechnik studiert. Er ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und befasst sich hauptsächlich mit der Abscheidung und nachhaltigen Nutzung von CO_2 .



Prof. Dr. Regina Palkovits ist seit 2010 Professorin an der RWTH Aachen University und führt den Lehrstuhl für Heterogene Katalyse und Technische Chemie. Zudem ist sie Max Planck Fellow am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion. Ihre Forschung konzentriert sich auf die Entwicklung von Katalysatoren und Prozessen für die effiziente Verwertung erneuerbarer Ressourcen. Zu den Hauptforschungsbereichen gehört die rationelle Entwicklung selektiver und langlebiger heterogener Katalysatoren für die maßgeschneiderte Umwandlung von Biomasse, CO_2 und anderen Rohstoffen in synthetische Kraftstoffe und Chemikalien.



Dr.-Ing. Philip Ruff hat in Darmstadt Chemie studiert und promoviert. Seit 2019 ist er bei der DECHEMA als Projektmanager für NAMOSYN tätig. Im Fachbereich Energie und Klima arbeitet er in mehreren Projekten mit den Schwerpunkten grüner Wasserstoff und Power-to-X-Technologien.



Dr.-Ing. Ouda Salem leitet seit 2018 die Gruppe Power to Liquid in der Wasserstofftechnologien-Bereich des Fraunhofer ISE. Er promovierte an der Technischen Universität München an der Entwicklung neuartiger Prozesse für die effiziente OME-Synthese (2015 – 2020). Er leitet die NAMOSYN-Aktivitäten am ISE und koordiniert die AP1B-1-Aktivitäten zur Bewertung und Systemanalyse mit den industriellen und akademischen Partnern.



Yoga Pranata Rahmat erhielt Mai 2020 den Masterabschluss in Prozess-, Energie- und Umweltsystemtechnik von der Technischen Universität Berlin. Seit Juni 2020 ist er beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. als wissenschaftlicher Mitarbeiter beschäftigt. Sein Forschungsgebiet ist die techno-ökonomische Analyse von Herstellungsprozessen der alternativen Kraftstoffe, z. B. MeOH und Methylformiat. Zudem führt er auch techno-ökonomische Studien von Wärmespeichertechnologien zur Energiewende und Dekarbonisierung durch.



Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer leitet das Institut für Katalysatorforschung und -technologie am KIT. Er beschäftigt sich mit der Prozessentwicklung dem Scale-up katalysierter Prozesse. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung von technischen Katalysatoren und Prozessen für die Umsetzung von CO_2 und die Herstellung von synthetischen Energieträgern, Kraftstoffen und Zwischenprodukten der chemischen Industrie.



Dr.-Ing. Rüdiger Reitz promovierte 2018 zum Thema Materialverträglichkeit in regenerativen Kraftstoffen. Er ist Gruppenleiter im Kompetenzfeld Betriebsstoffe und seit 2021 Abteilungsleitung Kompetenzbereich Oberflächentechnik MPA-IfW (Kompetenzfelder: Korrosion, Tribologie, funktionelle Oberflächentechnik und Betriebsstoffe).



Dr.-Ing. Achim Schaadt baute ca. 2011 die Aktivitäten im Bereich Power to Liquids (PtL) und Life Cycle Assessment (LCA) am Fraunhofer ISE auf. Derzeit leitet er zusammen mit Robert Szolák die Abteilung »Thermochemische Prozesse« mit ca. 50 Mitarbeitern, die die gesamte Prozesskette von Power to X-Produkten (Produktion, Transport, Nutzung) in Bezug auf Ökonomie, Ökologie und Technologie bewerten.



Mario Retzlaff ist seit 2019 bei Tenneco als Prüfstands- und Projektingenieur in der Vorentwicklung beschäftigt. Im Rahmen von NAMOSYN beschäftigte er sich mit der Emissionsmesstechnik und der Motorapplikation auf den synthetischen Kraftstoff.



M.Sc. Robert Schmitz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme an der TU Darmstadt im Bereich Large Eddy Simulationen (LES) reaktiver Strömungen und Rußbildung.



Kalim A. Sheikh studierte Chemie an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. Seit 2019 promoviert er am KIT-IKFT zur heterogen katalysierten Kettenverlängerung von Oxymethylenethern mittels Synthesegas.



Dr.-Ing. Qirui Yang ist seit 2020 Projektleiter für Forschungsprojekte und Softwareentwicklung am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS). Er betreute im Namosyn-Projekt die Arbeiten über 1D Motormodellierung und -simulation von sowohl ottomotorischen als auch dieselmotorischen synthetischen Kraftstoffen.



Dipl.-Ing. Richard Stegmann arbeitete nach dem Studium der Fahrzeug- und Motorentechnik an der TUM von 2012 bis 2018 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der TUM. Bei der Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG ist er seit 2020 verantwortlich für die Abteilung Thermodynamik mit den Schwerpunkten Brennverfahrensentwicklung und Emissionsapplikation zur Weiterentwicklung der Industrie-Dieselmotoren. Darüber hinaus ist er an verschiedenen Forschungsprojekten beteiligt.



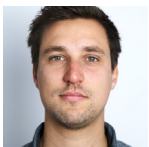
M.Sc. Florian Zacherl ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlung an der OTH Regensburg. Der primäre Forschungsschwerpunkt seiner Arbeiten liegt auf der Erforschung von alternativen Kraftstoffen für Dieselmotoren.



Dr. rer. nat. Beatrice Tübke ist promovierte Chemikerin im Bereich Umwelt- und analytischer Chemie. Seit 2008 arbeitet Frau Tübke als Leiterin der Arbeitsgruppe Analytik und Emissionsanalytik am Fraunhofer Institut für Chemische Technologie und beschäftigt sich vor allem mit der Identifizierung und Charakterisierung diverser Kunststofftypen sowie deren chemischen Eigenschaften.



Prof. Dr.-Ing. Niklas von der Aßen ist Professor für Technische Thermodynamik an der RWTH Aachen. Seine Forschungsschwerpunkte sind Methoden zur Bewertung und Gestaltung geschlossener (Kohlen-) Stoffkreisläufe in industriellen Prozessen mittels Technologieintegration, Sektorenkopplung und Power-to-X.



M.Sc. Steffen Walter ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik an der TU Darmstadt.



Prof. Dr.-Ing. Thomas Wetzel ist Professor für Wärme- und Stoffübertragung am Institut für Thermische Verfahrenstechnik und Leiter des Karlsruher Flüssigmetalllabors am KIT. Seine Forschungsthemen sind die Thermofluidynamik ein- und mehrphasiger Strömungen in komplexen Geometrien, das thermisch-elektrochemische Verhalten von Lithium-Ionen-Batterien und innovative flüssigmetallbasierte Prozesstechnik.



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Autor*innen	4
Inhaltsverzeichnis	11
1 Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe	
Sauerstoffhaltige Kraftstoffe für Diesel- und Ottomotoren	12
2 Arbeiten der Forschungscluster	
FORSCHUNGSCUSTER 1 A	
2.1 Oxymethylenether als nicht fossile Dieselalternative	
2.1.1 Zielsetzung	14
2.1.2 F&E-Ergebnisse	14
2.1.3 Ausblick	17
2.1.4 Publikationen	17
FORSCHUNGSCUSTER 1 B	
2.2 Oxymethylenether für Dieselmotoren – Prozessentwicklung und -optimierung	
2.2.1 Zielsetzung	20
2.2.2 F&E-Ergebnisse	20
2.2.3 Ausblick	23
2.2.4 Publikationen	24
FORSCHUNGSCUSTER 2	
2.3 E-Fuels für Ottomotoren	
2.3.1 Zielsetzung	25
2.3.2 F&E-Ergebnisse	26
2.3.3 Ausblick	30
2.3.4 Publikationen	31
FORSCHUNGSCUSTER 3	
2.4 Systemanalyse	
2.4.1 Zielsetzung	32
2.4.2 F&E-Ergebnisse	33
2.4.3 Ausblick	40
2.4.4 Publikationen	41
3 Ausblick	42
Projektpartner	46

Sauerstoffhaltige Kraftstoffe für Diesel- und Ottomotoren

AUTOR*INNEN

ISABEL KUNDLER

PHILIP RUFF

Als Alternativen zu fossilem Benzin, Diesel, Kerosin oder Erdgas existiert eine ganze Reihe synthetischer Kraftstoffe (engl.: E-Fuels oder synFuels), die z.B. über Power-to-X-Prozessen nachhaltig hergestellt werden können. Diese speichern grünen Strom aus Wind- oder Wasserkraftanlagen, Photovoltaik oder solarthermischen Kraftwerken in Form chemischer Energieträger und können in Verbrennungsmotoren in Bewegungsenergie umgewandelt werden.

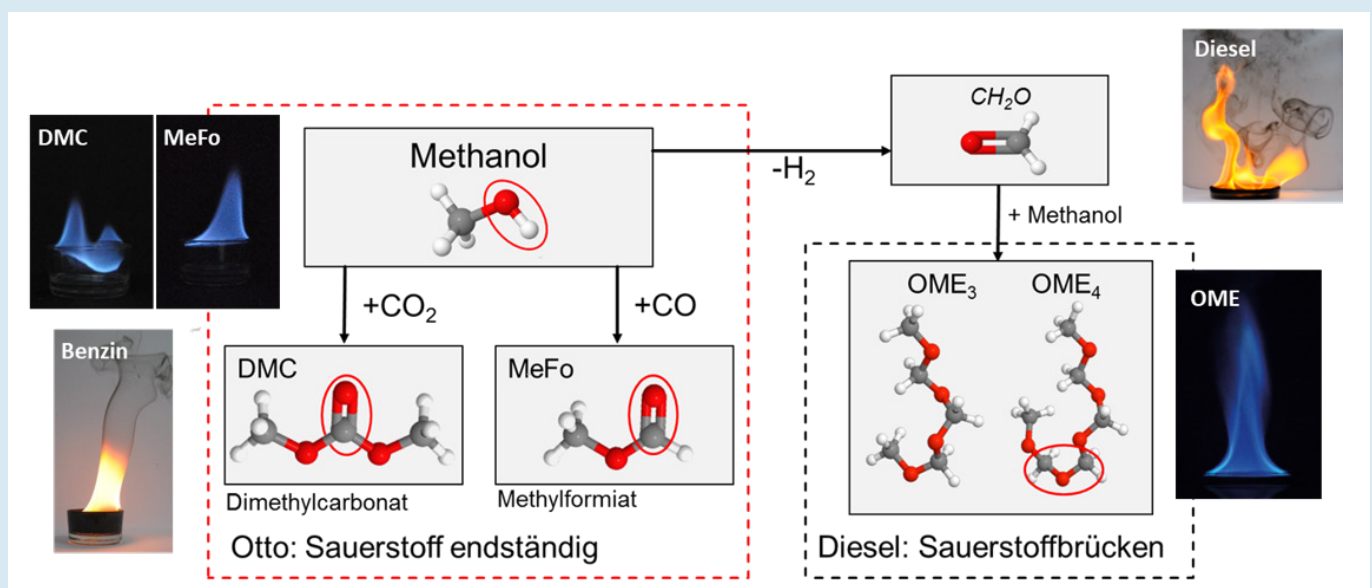
Beispiele hierfür sind synthetischer Diesel (Syntheseroute: Fischer-Tropsch), synthetisches Benzin (Syntheseroute: Methanol-to-Gasoline) oder synthetisches Kerosin (Syntheseroute: Fischer-Tropsch, Alcohol-to-Jetfuel), die in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften weitgehend identisch zu ihren fossilen Pendanten sind. Darüber hinaus kommen verschiedene längerkettige Alkohole (z.B. Oktanol), Methan und Wasserstoff in Frage, um nur einige zu nennen.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt »NAMOSYN – Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe« erforscht die Stoffklasse der C₁-Oxygenate im Hinblick auf ihre potenzielle Anwendung in modernen Diesel- und Ottomotoren. C₁-Oxygenate sind sauerstoffhaltige Verbindungen, in denen keine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen vorliegen. Dadurch unterscheiden sie sich von konventionellen Diesel- und Ottokraftstoffen, die i.d.R. nur einen sehr geringen Sauerstoffanteil aufweisen.

Das einfachste Molekül dieser Stoffklasse ist Methanol, aus dem die in NAMOSYN untersuchten Verbindungen Oxymethylenether (OME), Dimethylcarbonat (DMC) und Methylformiat (MeFo) synthetisiert werden können (Abbildung 1).

Abbildung 1

Darstellung der molekularen Struktur, Verbrennungseigenschaften und Synthese der C₁-Oxygenate Oxymethylenether (OME), Dimethylcarbonat (DMC) und Methylformiat (MeFo) aus Methanol².



²Quelle: Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile Antriebssysteme Technische Universität München, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe Technische Universität Darmstadt

Wird zu deren Herstellung ausschließlich erneuerbare Energie in Form von Strom, Wasserstoff und grünem Methanol sowie CO₂ aus der Atmosphäre oder biogenen Ursprungs verwendet, so wird bei deren Verbrennung anschließend genau so viel CO₂ in die Atmosphäre emittiert, wie zuvor chemisch in ihnen gebunden wurde. Im Idealfall entsteht so ein geschlossener CO₂-Kreislauf. Die Kraftstoffe sind dann zu 100% klimaneutral.

An dieser Stelle stellt sich die Frage, warum man nicht einfach auf synthetische Kraftstoffe zurückgreift, die nahezu identisch zu fossilen Diesel- bzw. Ottokraftstoffen sind. Aufgrund ihrer chemischen Struktur verbrennen OME, DMC und MeFo extrem rußarm (ebenfalls [Abbildung 1](#)). Als Reinkraftstoff verbrennen sie um über 99% sauberer. Und auch als Blend mit fossilem oder synthetischem Diesel- oder Ottokraftstoff ermöglichen sie je nach Mischungsverhältnis eine deutliche Reduktion der Rußemissionen. Zudem sind sie als flüssiger Kraftstoff mit deutlich geringerer Toxizität als konventionelle Kraftstoffe sehr gut handhabbar. Auf bestehende Infrastrukturen könnte zumindest teilweise zurückgegriffen werden.

Dem gegenüber stehen Herausforderungen bei der Materialauswahl. Einige metallische und polymere (hier insbesondere Elastomere) Werkstoffe, die den Kraftstoffen ausgesetzt sind, reagieren mit den, aufgrund des hohen Sauerstoffanteils, polaren Oxygenaten und verändern ihre Eigenschaften. Daher gilt es hier geeignete, beständige Materialien zu identifizieren. Bestehende Fahrzeuge und Motoren könnten so nachgerüstet und für die Verbrennung von Oxygenaten ertüchtigt werden.

Neben der Qualifizierung der Motoren für die Verbrennung von Oxygenatkraftstoffen konzentriert sich ein weiterer Forschungscluster des NAMOSYN-Projekts auf die Entwicklung effizienter Syntheserouten, um die Kraftstoffe zukünftig in ausreichenden Mengen herstellen zu können. Diese Prozesse müssen daher prinzipiell in den Worldscale-Maßstab übertragbar sein. Die Synthese erfolgt dabei aus grünem Methanol bzw. Folgeprodukten wie Formaldehyd. Methanol als weltweit gehandelte Basischemikalie erweist sich hier als smartes Plattformmolekül, das nachhaltig sowohl aus Biomasse gewonnen als auch synthetisch aus CO₂ und Wasserstoff hergestellt werden kann.

Sobald diese Kraftstoffe in Herstellung und Anwendung zur Marktreife entwickelt wurden und die Politik die notwendigen Weichen für eine Investition in diese Technologie gestellt hat, könnten die in NAMOSYN untersuchten Kraftstoffe dort zum Einsatz kommen, wo die Reduktion von Schadstoffemissionen ausschlaggebend (z.B. Nutzfahrzeugflotten in urbanen Ballungszentren) oder eine Direktelektrifizierung nicht problemlos möglich ist (z.B. Bau- und Landwirtschaftsmaschinen, Industriemotoren, Schifffahrt).

FORSCHUNGSCUSTER 1A

2.1 Oxymethylenether als nicht fossile Dieselalternative

AUTOR*INNEN

VISHEET ARYA

CHRISTIAN BEIDL

BENJAMIN BÖHM

PHILIPP DEMEL

ANDREAS DREIZLER

FEDERICA FERRARO

MICHAEL HAAS

CHRISTIAN HASSE

FRIEDEMAR KNOST

MATTHIAS OECHSNER

RÜDIGER REITZ

MARIO RETZLAFF

ROBERT SCHMITZ

RICHARD STEGMANN

BEATRICE TÜBKE

STEFFEN WALTER

QIRUI YANG

FLORIAN ZACHERL

2.1.1 Zielsetzung

Der Fokus dieses Forschungsclusters zur Bewertung des synthetischen Kraftstoffs Oxymethylenether liegt auf dem Einsatz von OME im Dieselmotor. Ziel des Clusters ist es, ein umfangreiches Bild des Betriebs mit OME zu schaffen und quantifizierte Anforderungen für einen möglichen Einsatz zu definieren. Neben der Charakterisierung der Verbrennungseigenschaften werden Aspekte hinsichtlich Materialverträglichkeit, Kraftstoffalterung sowie der Beständigkeit von motorischen Komponenten untersucht. Über simulative Modelle und experimentelle Untersuchungen wird die Rußentstehung an der OME-Flamme beschrieben. Darüber hinaus wird simulationsgestützt der motorische Prozess charakterisiert und ausgehend davon Optimierungsschritte abgeleitet. Parallel dazu werden in experimentellen Aufbauten der motorische Betrieb für ein breites Anwendungsfeld (PKW bis Industriemotor) charakterisiert und optimiert. Begleitet werden die Untersuchungen von einer Quantifizierung der Interaktionen von OME und OME-Diesel-Mischungen mit motorischen Komponenten, wie bspw. das Abgasnachbehandlungs- und das Einspritzsystem. Neben den motorischen Untersuchungen liegt ein weiterer Schwerpunkt auf der Untersuchung der Auswirkungen von OME auf motortypische Werkstoffe im Bereich der polymeren, elastomeren, metallischen sowie Filterwerkstoffe.

2.1.2 F&E-Ergebnisse

Weiterentwicklung von dieselmotorischen Brennverfahren

Ein mit OME oder OME-Blend betriebener Dieselmotor weist signifikante Vorteile hinsichtlich der Ruß-Emissionen auf (vgl. [Abbildung 2](#) links) [6,8]. Dies führt zu einem Wegfall des dieseltypischen Ruß-NO_x-Trade Offs. Dies kann über eine angepasste Motorapplikation in eine Reduktion der Stickoxidemissionen überführt werden (vgl. [Abbildung 2](#) rechts) bei einer gleichzeitig geringen Reduzierung der motorischen Effizienz gegenüber dem Dieselmotorbetrieb [5]. Durch den möglichen reduzierten Aufwand der Abgasnachbehandlung ergibt sich eine Kostenersparnis. Dabei ist zu beachten, dass der Betrieb eines aktuellen Serien-Dieselaggregats mit OME ohne Anpassungen von Hard- und Software aufgrund des geringeren Heizwerts von OME und damit einhergehend Limitierung des Serienkraftstoffsystems (Injektoren, Hochdruckpumpe) durch Leistungs- und Wirkungsgradeinbußen beschränkt ist. Dementsprechend ist der Betrieb im ganzen Kennfeld möglich, wenn vor dem Motorbetrieb die abgeleiteten Anforderungen an die motorischen Komponenten erfüllt sind.

Im Rahmen des Projekts wurde ein neu entwickeltes Rußmodell für die OME-Verbrennung, der Untersuchung der Rußbildung in OME-Flammen und der zugrunde liegenden Wirkmechanismen befähigt. In laminaren Vormischflammen konnte für eine OME-Beimischung im Kraftstoff eine signifikante Verminderung von insbesondere großen Rußaggregaten

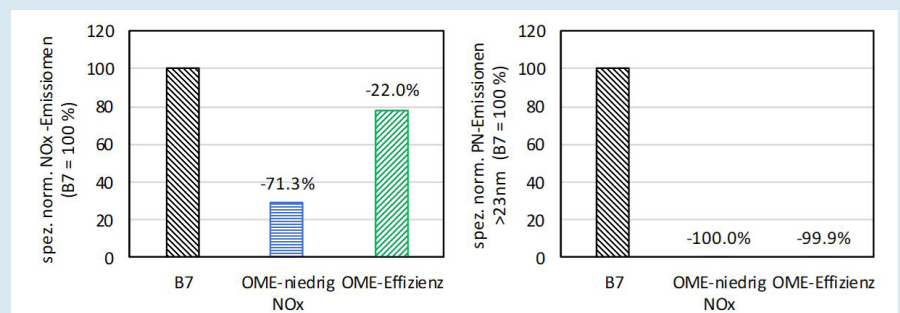
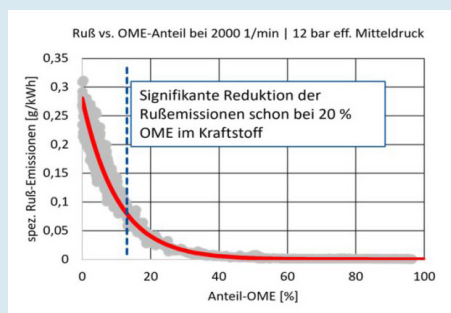
festgestellt werden [1] (näherungsweise lineare Abnahme des Rußvolumenbruchs mit steigendem OME-Anteil im Brennstoff [2]), kleinere Nanopartikel werden in der Anzahl nicht signifikant beeinflusst. Außerdem zeigen monomolekulare OMEs (OME_2 , OME_3 , OME_4) für einen vergleichbaren Kohlenstoffanteil im Brennstoff keine Unterschiede im Rußverhalten bezogen auf die Partikelgrößenverteilung, den Rußvolumenbruch oder den Volumenbruch kleinerer Nanopartikel in der untersuchten Flammenkonfiguration [3, 4]. Dies deckt sich mit den motorischen Untersuchungen von monomolekularen OMEs am Motorenprüfstand [7]. Die simulativen Ergebnisse wurden experimentell an einem Flammenprüfstand validiert, durch welchen gezeigt werden konnte, dass in turbulenten Jetflammen eine signifikante Reduzierung des Rußsignals und der Rußvorläuferprodukte (PAH) unter Zugabe von OME zu einem Dieselsurrogat zu erkennen ist.

Für kleine Off-Highway-Serienmotoren (mobile Arbeitsmaschinen) ist unter Beibehaltung der Motorleistung ein nahezu rußfreier Betrieb möglich. In diesem speziellen Anwendungsbereich führt die Reduktion der NO_x - und Partikelemissionen bei der OME-Verbrennung dazu, dass neue Applikationsfreiheitsgrade zur Schadstoffreduktion und Wirkungsgrad-Steigerung ermöglicht werden. Insbesondere für stark kostengetriebene Kleindieselmotoren mit begrenzten Möglichkeiten zur Abgasnachbehandlung besteht mit OME ein sehr großes Emissionsminderungspotenzial. Nebenbei entsteht über eine Anpassung der Einspritzstrategie das Potenzial, den motorischen Wirkungsgrad gegenüber dem Betrieb mit Diesel zu steigern. Um die Dauerhaltbarkeit von solchen Motoren bei der Verwendung von OME zu gewährleisten, muss der Motor bzgl. Hardware und Software angepasst werden [9, 10].

Abbildung 2

Abnahme der Rußemissionen in Abhängigkeit des OME-Anteils im Kraftstoff (links) für einen PKW-Motor und vergleichende Zyklergebnisse (WHSC) mit einem Industriemotor für Diesel und OME mit verschiedenen Motoreinstellungen (niedrige Stickoxidemissionen = blau, vergleichbare Dieseleffizienz = grün) (rechts)

Wegen unterschiedlicher Rohemissionen, niedrigerer Abgastemperaturen und milderer Alterungsanforderungen werden sich auf OME-Betrieb optimierte Abgasnachbehandlungssysteme deutlich von konventionellen Diesel-Abgassystemen unterscheiden. Diese optimierten Abgassysteme können auf Grund ihrer voraussichtlich niedrigeren Kosten einen wichtigen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit des OME-Ansatzes leisten. Daher wurde ein dynamischer Laborprüfstand aufgebaut, an dem verschiedene Szenarien für die Abgasbehandlung früh im Entwicklungsprozess effizienter, kostengünstiger und unabhängig



von der Verfügbarkeit eines Motors getestet werden können. Im Speziellen wurden im Rahmen des Projektes auf den OME-Betrieb optimierte Katalysatoren entwickelt und untersucht, welche eine sehr gute Niedertemperatur-Aktivität für die Oxidation von CO aufweisen, deren Materialien bisher aber auf Grund der ausgeprägten Alterungsbedingungen (hohe Abgastemperaturen und Schwefel) für die Anwendung in konventionellen Diesel-Abgassystemen ungeeignet waren [11].

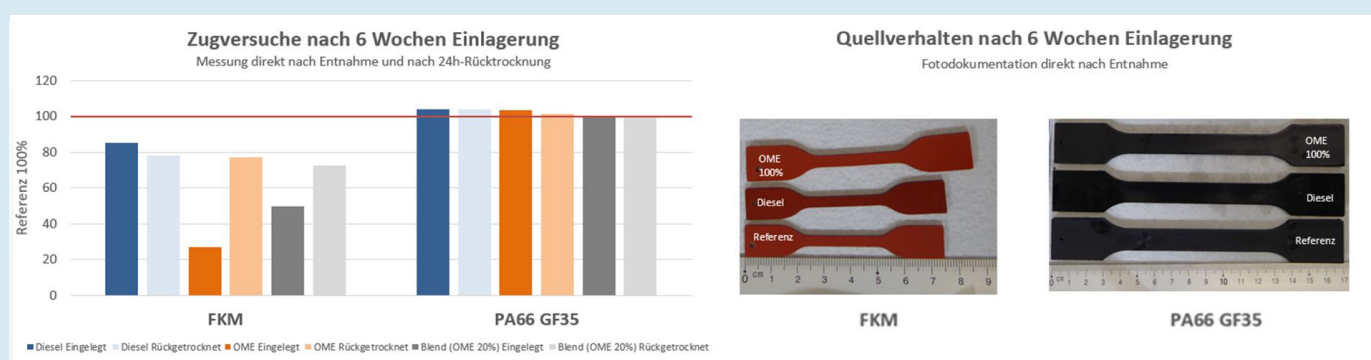
Wechselwirkungen von OME und OME-Diesel-Mischungen mit verschiedenen Materialien

Im Rahmen von NAMOSYN gelang die Entwicklung valider Prüfmethode zur zuverlässigen Bewertung der Materialverträglichkeit in OME und OME-Diesel-Blends. Grundsätzlich weisen alle untersuchten metallischen Werkstoffe und Beschichtungen eine sehr gute Materialverträglichkeit in reinen OME-Kraftstoffen auf. Bereits geringste Mengen an Verunreinigungen, wie beispielsweise ein Eintrag von Wasser und Salzen, kann zu einer teils erheblichen Korrosion insbesondere an Stahlwerkstoffen und Aluminiumlegierungen führen. Mit Blick auf die Beständigkeit metallischer Werkstoffe ist reines OME als Kraftstoff für den isolierten Flottenbetrieb unkritisch; eine etwaige Rückwärtskompatibilität von OME-Blends in Bestandsflotten muss für jeden Werkstoff spezifisch bewertet werden [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Die Materialverträglichkeit von kraftstoffführenden Komponenten wurde mit Hilfe von Langzeitkontakttests in OME-basierten Kraftstoffgemischen und Versuchen zur Alterungsbeständigkeit näher betrachtet. Elastomere Materialien wie beispielsweise herkömmliche Fluorkautschuke sind vor allem mit Blick auf die Zugfestigkeit erheblich in ihren physikalischen Eigenschaften beeinträchtigt (vgl. **Abbildung 3** links). Thermoplastische Werkstoffe wie glasfaserverstärkte Polyamide (PA6/PA66) zeigen sich hingegen unauffällig nach den Immersionsversuchen. Im Bereich der Elastomere sind Entwicklungsaktivitäten und Materialmodifikationen erforderlich, erste Erfolge durch geringe Veränderungen in der Formulierungszusammensetzung der Materialien sind erkennbar.

Abbildung 3

Ergebnisse der Einlagerungsversuche für elastomere (FKM) und polymere (PA66 GF35) Werkstoffe in Zugversuchen (links) und Quellverhalten (rechts)



2.1.3 Ausblick

Ausgehend von den Ergebnissen der einzelnen Arbeitspakete konnte ein umfassendes Bild für den Betrieb von Motoren in einem breiten Anwendungsgebiet erstellt werden. Es wurden Anforderungen an die Materialverträglichkeit sowie an die nötigen Anpassungen des Motorbetriebs definiert sowie Optimierungsmethoden (Effizienz, Emissionen) abgeleitet. Ziel von zukünftigen Vorhaben ist es, die Vorteile von OME als Reinstoff und als Komponente in Kraftstoffblends in Flottenanwendungen zu demonstrieren. Dies ist insbesondere für Anwendungen von großer Bedeutung, in denen die lokale Luftqualität (niedrige Stickoxid- und Rußemissionen) bei gleichzeitig niedrigen Kosten für Motor und das Abgasnachbehandlungssystem von essenzieller Bedeutung ist.

2.1.4 Publikationen

- [1] **F. Ferraro, C. Russo, R. Schmitz, C. Hasse and M. Sirignano**, Experimental and numerical study on the effect of oxymethylene ether-3 (OME₃) on soot particle formation, *Fuel*, vol. 286, no. P1, p. 119353, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119353.
- [2] **R. Schmitz, M. Sirignano, C. Hasse and F. Ferraro**, Numerical Investigation on the Effect of the Oxymethylene Ether-3 (OME₃) Blending Ratio in Premixed Sooting Ethylene Flames, *Front. Mech. Eng.*, vol. 7, no. August, pp. 1–11, 2021, doi: 10.3389/fmech.2021.744172.
- [3] **R. Schmitz, C. Russo, F. Ferraro, B. Apicella and C. Hasse**, Effect of oxymethylene ether-2-3-4 (OME 2-4) on soot particle formation and chemical features, *Fuel*, vol. 324, no. PB, p. 124617, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124617>.
- [4] **R. Schmitz, F. Ferraro, M. Sirignano and C. Hasse**, Particle formation in oxymethylene ethers (OMEn, n = 2-4) / ethylene premixed flames, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.10733>.
- [5] **P. Demel, F. Knost, A. Mokros, C. Beidl**, Operation of OME in a single cylinder research engine and a series engine – An Analysis of efficiency and ultralow emissions by an OME-specific application. In: *Internationaler Motorenkongress 2021 : Proceedings*, S. 521-533, Wiesbaden, Springer Vieweg, Internationaler Motorenkongress 2021, Baden-Baden, DOI: 10.1007/978-3-658-35588-3_30
- [6] **P. Demel, C. Beidl**, CO₂ Neutral Fuels in Series Engines – Demonstration of the Potential of OME with Regard to Efficiency and Ultra-Low Emissions. In: *SAE Technical Paper Series*, 2021-24-0061, Capri, SAE International, 15th International Conference on Engines & Vehicles, Capri, 12-16 September 2021, DOI: 10.4271/2021-24-0061
- [7] **F. Knost, P. Demel, A. Mokros, C. Beidl**, The characterization of the working process of oxymethylene ether (OME) – An analysis of the influence of different OMEs on thermodynamic process variables on a series and a single-cylinder research engine. In: *Nachhaltigkeit in Mobilität, Transport und Energieerzeugung*, S. 295-308, Graz, Österreich, Verlag der Technischen Universität Graz, Nachhaltigkeit in Mobilität, Transport und Energieerzeugung – Sustainable Mobility, Transport and Power Generation, Graz, Österreich, 23.– 24. September 2021, ISBN 978-3-85125-843-1
- [8] **A. Mokros, P. Demel, F. Knost, C. Beidl**, Impact of OME-Diesel blends to a state of the art exhaust gas aftertreatment system and resulting tailpipe emissions of a multi cylinder and a single cylinder research engine; In: *Internationaler Motorenkongress 2022*, Baden-Baden
- [9] **R. Stegmann**, Oxymethylene Ethers: Application in naturally aspirated, off-road diesel engines for ultra-low emissions, 3rd International Workshop: Perspectives on Power to Liquids/Power to Chemicals 2022, Freiburg im Breisgau.

- [10] **R. Stegmann**, Diesel and beyond – technology driven evolution for future non-road powertrain solutions, High Altitude Emissions Symposium 2022, Ruka, Kuusamo, Finland.
- [11] **D. Eisenbeil, P. Demel, M. Haas, H. Hamel, B. Betz, A. Dreizler, C. Beidl, M. Votsmeier**, Short pulse reductive activation of Pt/ceria for the low-temperature CO abatement in vehicles operated with the synthetic Diesel fuel OME, Topics in Catalysis, 2022, under review
- [12] **R. Reitz, V. Arya, C. T. Engler, M. Oechsner**, Investigation of Automotive Materials Compatibility for Synthetic Fuels – Oxymethylene dimethyl ethers (OMEs), MS&T 2021, June 23 2022, Online-USA.
- [13] **R. Reitz, V. Arya, C. T. Engler, M. Oechsner**, Material Compatibility in Renewable Fuels and Characterization Methods, FSC 2020, June 23 2022, Aachen.
- [14] **R. Reitz, V. Arya, C. T. Engler, M. Oechsner**, Compatibility of metallic materials in renewable OME fuels, FSC 2021, June 24 2022, Aachen.
- [15] **V. Arya, R. Reitz, M. Oechsner**, Synthetic Fuels – How to Successfully Evaluate the Materials Compatibility of Automotive Alloys in OMEs, FSC 2022, May 10th 2022, Aachen (veröffentlicht)
- [16] **V. Arya, R. Reitz, M. Oechsner**, Mobilitätswende II: Regenerative Kraftstoffe – Methoden zur Bewertung der Materialverträglichkeit am Beispiel synthetischer Kraftstoffblends, Wasserstoff-seminar 2022, July 13th 2022, Darmstadt
- [17] **M. Pieperhoff, V. Arya, R. Reitz, M. Oechsner**, Investigation of the effect of fuel ageing and corrosion in oxymethylene ether (OME), EUROCORR 2022, August 29th 2022, Berlin (Poster)
- [18] **R. Reitz, V. Arya, M. Oechsner** Test Method Development to Evaluate the Corrosion Behavior of Aluminum Materials in Oxygenates (OMEs), MS&T 2022, October 9th 2022, Pennsylvania



FORSCHUNGSCLUSTER 1 B

2.2 Oxymethylenether für Dieselmotoren – Prozessentwicklung und -optimierung

AUTOR*INNEN

RAMY E. ALI

ULRICH ARNOLD

CHALACHEW M. ASMELASH

DOMINIK BONGARTZ

JAKOB BURGER

JANNIK BURRE

G. WILMA BUSSE

ANKUR GOSH CHOWDHURY

MARIUS DREXLER

FABIAN EICHNER

ALVARO FERRE

ANDREAS JUPKE

CHRISTOPH KABATNIK

MARTA KAMIENOWSKA

JÜRGEN KLANKERMAYER

INGO KROSSING

FRANZ MANTEI

MARIIA MERKO

ALEXANDER MITSOS

MARTIN MUHLER

KLARISSA NIEDERMEIER

OLE OSTERHUN

REGINA PALKOVITS

OUDA SALEM

JÖRG SAUER

ACHIM SCHAADT

KALIM A. SHEIK

THOMAS WETZEL

2.2.1 Zielsetzung

Ziel ist die Entwicklung von energie- und rohstoffeffizienten Prozessen zur Herstellung von Oxymethylenethern, die eine aussichtsreiche Alternative zu fossilen Dieselmotoren darstellen. Dabei stellt die Eignung zur Skalierung in den »World-Scale-Maßstab« von 100 kt/a bis zu 1 Mio. t/a ein wichtiges Kriterium dar. Dies impliziert die effiziente Herstellung der Grundbausteine aus regenerativen Quellen, die Verfahrensentwicklung durch Kombination optimierter Einzelschritte zu einem optimierten Gesamtsystem, die Bereitstellung von Mustermengen (Zwischenprodukte + OME-Kraftstoff) und eine umfängliche Systembewertung, die auch die Qualität des Kraftstoffs einschließt.

2.2.2 F&E-Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse wurden von 20 Partnern aus Industrie und einer Reihe von Forschungseinrichtungen erarbeitet. Die Aktivitäten gliedern sich in drei Arbeitspakete, die im Folgenden genauer erläutert werden.

Arbeitspaket 1 – Bewertung und Systemanalyse der OME-Herstellung

Im ersten Arbeitspaket des Synthesecusters wurden energie- und rohstoffeffiziente Prozesse zur Herstellung von OME entwickelt und besonders vielversprechende Prozessrouten im Hinblick auf die folgenden Kriterien verglichen und bewertet: OME-Gestehungskosten, Energieeffizienz, CO₂-Fußabdruck und technischer Reifegrad des Prozesses (TRL). Als besonders vorteilhaft haben sich die Prozessrouten erwiesen, bei denen wasserfreier Formaldehyd zum Einsatz kommt, so dass die Bildung von Wasser in der Reaktionskaskade komplett vermieden werden kann und die Produktaufarbeitung deutlich einfacher und effizienter wird [1]. Ein Prozessentwurf für die großtechnische OME-Herstellung unter industriellen Randbedingungen wurde vom Fraunhofer ISE zusammen mit den Industriepartnern Mitsubishi Power Europe und RWE entwickelt, wobei die Auswahl und Dimensionierung der Apparate, die energetische Optimierung und die Einbindung in einen Chemiapark im Vordergrund standen. Damit wurde die Planungsgrundlage für eine großtechnische OME-Produktion geschaffen. Zur wirtschaftlich erfolgreichen Umsetzung der F&E-Ergebnisse, wird der Einsatz von Wärmepumpen vorgeschlagen, wodurch die Niedertemperaturabwärme der OME-Herstellung für weitere Sektoren und Prozesse nutzbar gemacht und der Wirkungsgrad der gesamten OME-Wertschöpfungskette deutlich erhöht werden kann. Weitere in diesem Arbeitspaket angesiedelte Themen, die u.a. auch von den Firmen Evonik, BASF und BP bearbeitet wurden, waren Anlagenkonzepte, das Engineering für die Maßstabsvergrößerung sowie die Verarbeitung von OME zu marktfähigen Kraftstoffen.

Arbeitspaket 2 – Synthese der OME-Vorstufen Formaldehyd und Dimethylether (DME) sowie OME-Synthese aus DME, CO₂ und Methanol

Formaldehyd ist eine wichtige Plattformchemikalie der chemischen Industrie und spielt bei der OME-Herstellung eine Schlüsselrolle. Üblicherweise wird Formaldehyd durch Oxidation von Methanol gewonnen, wobei der dem Methanol entzogene Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser umgesetzt wird. Eine Alternative hierzu ist die trockene Spaltung von Methanol in Formaldehyd und Wasserstoff mit anschließender Nutzbarmachung des gebildeten Wasserstoffs. Diese gilt als dream reaction, für die allerdings noch kein wirtschaftliches Verfahren etabliert ist. Hier knüpften vier Teilprojekte an, die in Kooperation des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und BASF durchgeführt wurden:

1. Am Institut für thermische Energietechnik und Sicherheit (KIT-ITES) wurde eine Laboranlage errichtet, mit der die Umsetzung von Methanol in der Gasphase mit Hilfe von Natriumdampf untersucht wird. Schwerpunkte waren bislang die Konstruktion und Optimierung des Dosiersystems für den Natriumkatalysator sowie die Entwicklung eines Systems zur Rückgewinnung des Katalysators.
2. In einem weiteren, am Institut für Katalyseforschung und -technologie (KIT-IKFT) durchgeführten, Teilprojekt wurden Zinkoxid-Katalysatoren für die direkte Dehydrierung von Methanol untersucht. Die größte Herausforderung ist dabei die Reduktion des Metalloxides, die zu einer schnellen Deaktivierung führt. Durch gezielte Optimierung der Katalysatorherstellung konnte nicht nur die Stabilität des Katalysators im Hochtemperaturbetrieb verbessert, sondern auch die Ausbeute an wasserfreiem Formaldehyd gesteigert werden.
3. Am IKFT wurde auch an einer Optimierung des industriellen Silberkontaktverfahrens gearbeitet, woran auch die Fa. Linde beteiligt war. Im Rahmen von experimentellen Studien wurden wichtige Parameter zur Bildung von Wasserstoff identifiziert, wodurch die Wasserstoffausbeute maximiert und die Gesamteffizienz des Verfahrens optimiert werden kann. Weiterhin wurden industriell relevante Prozesse zur Abtrennung von Wasserstoff aus dem Abgas des Verfahrens untersucht.
4. Ein weiterer Ansatz, der am IKFT und LIKAT untersucht wurde, war die direkte Umsetzung von Methanol bzw. Methanolderivaten mit Synthesegas. Da Synthesegas in seiner elementaren Zusammensetzung dem Formaldehyd entspricht, besteht die Möglichkeit zum Aufbau von OME-Strukturen unter Vermeidung von Formaldehyd als Einsatzstoff. Dabei wurde das Auffinden geeigneter Katalysatoren durch dichtefunktional-theoretische Methoden unterstützt.

In einem weiteren Teilprojekt zur Herstellung von wasserfreiem Formaldehyd wurde am Lehrstuhl für Technische Chemie der Ruhr-Universität Bochum an neuen Katalysatorsystemen für die Dehydrierung von Methanol geforscht. Dabei haben sich Galliumoxid-basierte Katalysatoren als sehr aktiv und effizient erwiesen [2]. Im Vergleich zu Na₂CO₃,

das ein klassischer Katalysator für diese Reaktion ist, wurde mit ungeträgertem β -Ga₂O₃ eine mehr als doppelt so hohe Produktivität erzielt, welche bei einer 100 °C niedrigeren Temperatur von 550 °C erreicht wurde. Darüber hinaus wurde gefunden, wie man die Auswirkungen der Deaktivierung des Katalysators durch eine spezielle oxidative Behandlung rückgängig machen kann. Außerdem konnte mit einem geträgerten Katalysator (Ga₂O₃ / SiO₂) der Nutzungsgrad der aktiven Komponente Gallium für die Formaldehyd-Bildung um etwa das Vierfache gesteigert werden.

Neben der Herstellung von Formaldehyd wurde die direkte Synthese von Dimethylether bearbeitet, der einen vielversprechenden Ausgangsstoff für die wasserfreie OME-Synthese darstellt. Die entsprechenden Arbeiten wurden an der Universität Freiburg und am Freiburger Materialforschungszentrum durchgeführt. Für das Verfahren, das von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid ausgeht, wurde eine Vielzahl an Katalysatoren untersucht, die u.a. von Fa. Clariant zur Verfügung gestellt wurden. Es wurde experimentell nachgewiesen, dass unter thermodynamisch kontrollierten Bedingungen ein klarer Vorteil bei der Umsetzung von CO₂ besteht, gegenüber der indirekten DME-Synthese mit Methanol als isoliertes Zwischenprodukt.

Hinsichtlich der Herstellung von OME ist die wasserfreie Synthese aus DME und trockenem Formaldehyd eine attraktive Option. Auf diese Weise können hohe Selektivitäten zu den Zielfractionen erreicht sowie der energetische Aufwand zur Aufarbeitung der Produktgemische reduziert werden. Am IKFT wurden geeignete Katalysatoren gefunden, die eine effiziente Flüssigphasenreaktion von DME mit Trioxan als Formaldehydquelle ermöglichten. Im Rahmen des NAMOSYN-Projekts wurde das Verfahren optimiert und eine Demonstrationsanlage mit einer Produktionskapazität von 1 kg/h errichtet und betrieben [3, 4]. In einer Verfahrensvariante, die an der Universität Freiburg und am Freiburger Materialforschungszentrum entwickelt wurde, konnten DME und Formaldehyd erstmals in der Gasphase zu OME umgesetzt werden. Dabei erfolgte die Umsetzung in einem kontinuierlichen Prozess unter atmosphärischem Druck und milden Temperaturen. In der wasserfreien OME-Synthese konnte somit der Schritt von einem industriefernen, reinen Batchprozess zu einem industrierelevanten, kontinuierlichen Prozess gemacht werden [5].

Über diese Synthesepfade hinaus konnte an der RWTH Aachen ein Mehrphasensystem zur Herstellung von OME₁ aus CO₂ entwickelt werden. In der Aachener Verfahrenstechnik konnte für dieses Mehrphasensystem ein Prozess entwickelt und simuliert werden. Die Zusammenarbeit zwischen Verfahrenstechnik und Technischer Chemie erlaubte dabei, Reaktionsbedingungen und Lösungsmittel bereits mit Blick auf den potenziellen Prozess auszuwählen und für den Prozess zu optimieren [6 – 8]. Neben der Herstellung von OME₁ aus CO₂ wurde auch die Herstellung von OME_x aus Methanol in der Gasphase untersucht. Hier gelang es durch einen speziell angepassten Reaktor, die Produktausbeuten deutlich zu steigern [9,10].

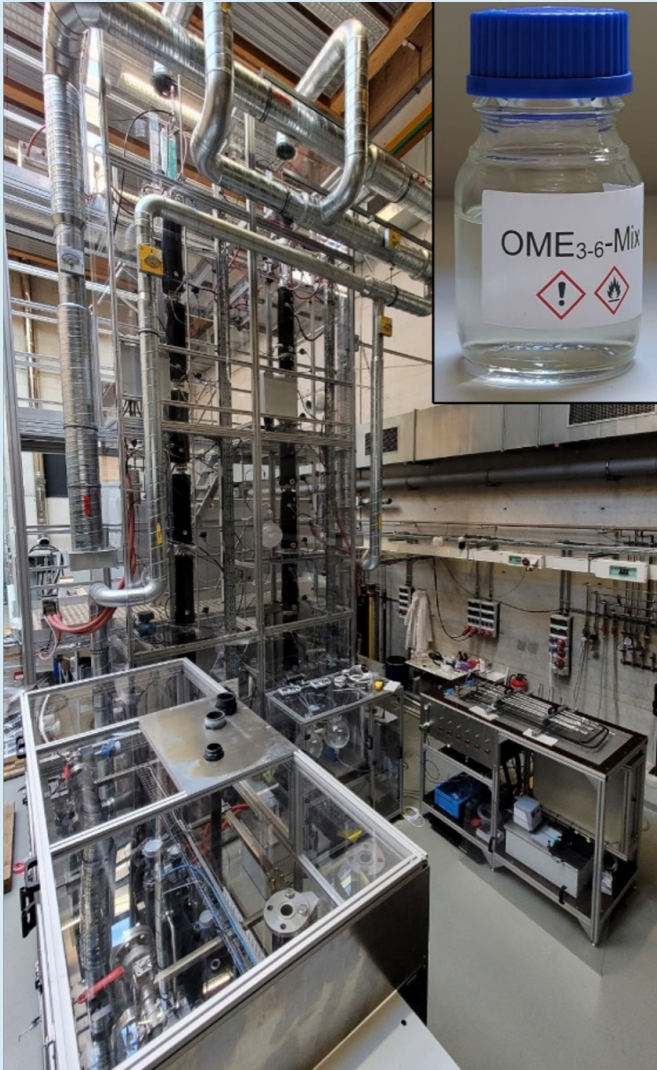


Abbildung 4
OME-Demonstrationsanlage an der TU München und OME-Produkt.
Foto: TU München

Arbeitspaket 3 – Aufbau einer Demonstrationsanlage zur OME-Herstellung aus Methanol und Formaldehyd

Im Rahmen des dritten Arbeitspakets standen die industrielle OME-Synthese und die Maßstabsvergrößerung der Produktion im Vordergrund. Dazu wurde am Campus Straubing der TU München zusammen mit den Partnern, DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH und TU Kaiserslautern, die erste europäische, kontinuierlich produzierende Demonstrationsanlage mit einer Kapazität von 8 t/a errichtet [11 – 15]. Mit der Anlage wurde ein Prozess pilotiert, der direkt auf der Verwendung von Methanol und Formaldehydlösungen basiert. Sie besteht aus einem Rohrreaktor, einer zweistufigen Destillationssequenz und einer Membraneinheit (s. [Abbildung 4](#)). Die nominell hohen Formaldehydkonzentrationen (teilweise über 50 Gew.-%) in vielen Prozessströmen und dessen Löslichkeit stellten die Hauptherausforderung dar. Im Projekt NAMOSYN wurde erfolgreich demonstriert, dass mit dem Prozess hochreines OME der Kettenlänge 3 – 6 mit hoher Anlagenverfügbarkeit produziert werden kann.

2.2.3 Ausblick

Durch die eingehende Betrachtung und den direkten Vergleich unterschiedlicher Prozessrouten für die Herstellung von OME konnten erhebliche Potentiale für eine optimierte, nachhaltige und wirtschaftliche OME-Produktion identifiziert werden. Diese gilt es nun in einer industriellen Umsetzung zu realisieren. Durch die erfolgreiche Demonstration der OME-Synthese und -Aufreinigung im kontinuierlichen 8 t/a-Maßstab, konnte eine solide Grundlage für die Errichtung einer Anlage im industriellen Umfeld geschaffen werden.

2.2.4 Publikationen

- [1] F. Mantei, R. E. Ali, C. Baensch, S. Voelker, P. Haltenort, J. Burger, R.-U. Dietrich, N. von der Assen, A. Schaadt, J. Sauer, O. Salem, Techno-economic assessment and carbon footprint of processes for the large-scale production of oxymethylene dimethyl ethers from carbon dioxide and hydrogen, *Sustainable Energy Fuels* 6 (2022) 528-549.
- [2] M. Merko, G. W. Busser, M. Muhler, Non-oxidative Dehydrogenation of Methanol to Formaldehyde over Bulk β -Ga₂O₃, *ChemCatChem* 14 (2022) e202200258.
- [3] M. Drexler, P. Haltenort, U. Arnold, J. Sauer, Continuous Synthesis of Oxymethylene Ether Fuels from Dimethyl Ether in a Heterogeneously Catalyzed Liquid Phase Process, *Chem. Ing. Tech.* 94 (2022) 256-266.
- [4] M. Drexler, P. Haltenort, U. Arnold, J. Sauer, S. A. Karakoulia, K. S. Triantafyllidis, Progress in the anhydrous production of oxymethylene ethers (OME) as a renewable diesel fuel in a liquid phase process, *Catal. Today* (2022) <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.07.015>
- [5] A. Peter, G. Stebens, J. F. Baumgärtner, E. Jacob, F. K. Mantei, M. Ouda, I. Krossing, Facile Two-Phase Catalysis: From Dimethoxymethane and Monomeric Formaldehyde towards Oxymethylene Ethers (OMEs), *ChemCatChem* 12 (2020) 2416-2420.
- [6] K. Beydoun, K. Thenert, J. Wiesenthal, C. Hoppe, J. Klankermayer, Utilization of Formic Acid as C₁ Building Block for the Ruthenium-Catalyzed Synthesis of Formaldehyde Surrogates, *ChemCatChem* 12 (2020) 1944-1947.
- [7] J. Burre, D. Bongartz, S. Deutz, C. Mebrahtu, O. Osterthun, R. Sun, S. Völker, A. Bardow, J. Klankermayer, R. Palkovits, A. Mitsos, Comparing pathways for electricity-based production of dimethoxymethane as a sustainable fuel, *Energy Environ. Sci.* 14 (2021) 3686-3699.
- [8] J. Burre, C. Kabatnik, M. Al-Khatib, D. Bongartz, A. Jupke, A. Mitsos, Global flowsheet optimization for the reductive dimethoxymethane production using data-driven thermodynamic models, *Comput. Chem. Eng.* 162 (2022) 107806.
- [9] R. Sun, C. M. Asmelash, J. P. Hofmann, D. Bongartz, J. Burre, P. J. C. Hausoul, C. H. Gierlich, A. Mitsos, R. Palkovits, Hydrogen-efficient non-oxidative transformation of methanol into dimethoxymethane over a tailored bifunctional Cu catalyst, *Sustainable Energy Fuels* 5 (2021) 117-126.
- [10] C. Mebrahtu, R. Sun, C. H. Gierlich, R. Palkovits, Unraveling the structure-activity relationships of Cu/H-BEA bifunctional catalyst for selective synthesis of dimethoxymethane by non-oxidative dehydrogenation of methanol, *Appl. Catal., B* 287 (2021) 119964.
- [11] A. Ferre, J. Voggenreiter, Y. Tönges, J. Burger, Demonstration Plant for the Synthesis of OME Fuels, *MTZ Worldwide* 82 (2020) 26-31.
- [12] J. Voggenreiter, A. Ferre, J. Burger, Scale-up of the Continuous Production of Poly(oxymethylene) Dimethyl Ethers from Methanol and Formaldehyde in Tubular Reactors, *Ind. Eng. Chem. Res.* 61 (2022) 10034-10046.
- [13] C. F. Breitzkreuz, J. Burger, H. Hasse, Solid-liquid equilibria and kinetics of the solid formation in binary and ternary mixtures containing (formaldehyde + water + methanol), *Ind. Eng. Chem. Res.* 61 (2022) 1871-1884.
- [14] A. Ferre, J. Burger, Coadsorption Equilibria on Molecular Sieves 3A and Densities of Liquid Mixtures Containing Formaldehyde, Methanol, and Water at 295.15 and 313.15 K, *Ind. Eng. Chem. Res.* 60 (2021) 15265-15263.
- [15] J. Voggenreiter, J. Burger, Side Products in the Water-Tolerant Synthesis of Poly(oxymethylene) Dimethyl Ethers: Formation Kinetics and Implications for Process Design, *Ind. Eng. Chem. Res.* 60 (2021) 2418-2429.

FORSCHUNGSCLUSTER 2

2.3 E-Fuels für Ottomotoren

AUTOR*INNEN

NIKLAS GEBEL

SANKET GIRHE

TOBIAS GORAL

MARTIN HÄRTL

CHANDRA KANTH KOSURU

DANIEL KOCH

CHRISTOPH KRAUS

MARIO RETZLAFF

QIRUI YANG

2.3.1 Zielsetzung

Mit der Entwicklung nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe ist die Forderung verbunden, dass diese für die Verwendung in Verbrennungsmotoren optimale Eigenschaften aufweisen. Insbesondere umfasst dies die weitgehende Freiheit von unerwünschten Emissionen wie Partikeln, unverbrannten organischen Komponenten und Stickoxiden. Ein dediziert emissionsarmer Kraftstoff ergänzt somit die innermotorischen Maßnahmen und die modernen Systeme der Abgasnachbehandlung in optimaler Weise. Darüber hinaus sind Anforderungen an die Funktionalität gegeben, wie beispielsweise eine hohe Energiedichte, sichere Handhabung und gutes Verbrennungsverhalten.

Ausgangspunkt der Forschung ist die Erkenntnis, dass die Präsenz von C-C-Bindungen im Kraftstoff die Bildung von Rußvorläufersubstanzen begünstigt. C₁-Kraftstoffe wie Methanol, Dimethylcarbonat und Methylformiat hingegen enthalten keine C-C-Bindungen und zeichnen sich durch eine nochmals geringere Rußbildung als andere Oxygenate aus. Die Forschung an Ottomotoren in NAMOSYN konzentrierte sich daher auf die Untersuchung der C₁-Kraftstoffe Dimethylcarbonat, Methylformiat und Methanol.

Aus Voruntersuchungen ist bekannt, dass die untersuchten C₁-Kraftstoffe aufgrund ihrer hohen Klopffestigkeit in Ottomotoren enorme Potentiale hinsichtlich des Wirkungsgrades und der Schadstoffemissionen mit sich bringen. Ziel der Forschung ist es daher, diese Potentiale rechnerisch vorherzusagen und im Experiment nachzuweisen, wobei Anpassungen an der Konstruktion der Motoren zur besseren Ausschöpfung der positiven Effekte aus dem Kraftstoff inbegriffen sind.

Ein weiteres Ziel ist die Untersuchung und Sicherstellung der Stabilität der Kraftstoffe über längere Zeit ohne Qualitätsverschlechterung. Dies wird durch grundlegende Arbeiten im analytischen Bereich (PH-Wert-Messung) und bei der Additiventwicklung erreicht sowie durch Langzeitversuche und Materialverträglichkeitsuntersuchungen abgesichert.

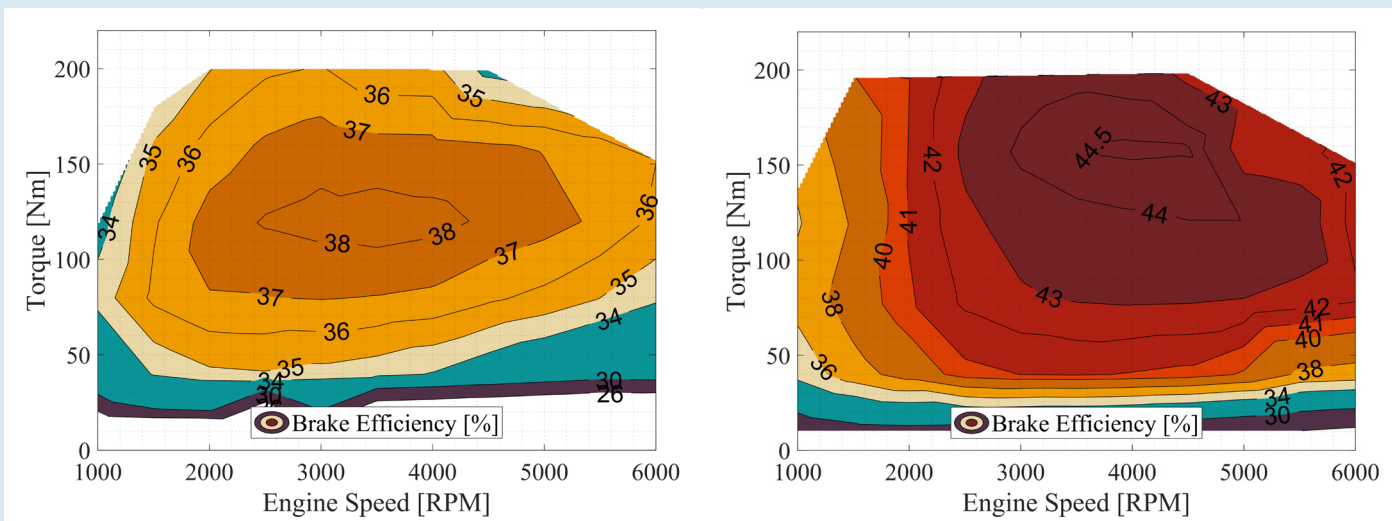
Da weitgehende technische Änderungen an Motoren in der Bestandsflotte kaum möglich sind, ist ein weiteres Ziel des Projektes herauszufinden, ob die untersuchten C₁-Oxygenate im Gemisch mit konventionellen und synthetischen Ottokraftstoffen zusammen eingesetzt werden können. Dies wird durch die Untersuchung von Blends mit Ottokraftstoff erreicht. Da in der entsprechenden Norm (DIN EN 228) nur bestimmte Oxygenate – wie z. B. Ethanol – zugelassen sind, können an dieser Stelle nur Perspektiven für eine zukünftige Modifikation der Normungswerke aufgezeigt werden.

2.3.2 F&E-Ergebnisse

An der Technischen Universität München wird ein Einzylinderforschungsmotor so umgerüstet, dass dieser sowohl mit herkömmlichem Benzin als auch mit verschiedensten Blends und reinen Oxygenatkraftstoffen betrieben werden kann. Dafür wird der Tank und das Einspritzsystem aus besonders beständigen Materialien wie Edelstahl und FFKM gefertigt. Zudem wird der Forschungsmotor mit aktueller Abgasmesstechnik in Form eines FTIRs bestückt. Mittels im Projekt entwickelter Auswerte-Methodik können die gasförmigen Abgasbestandteile aller Kraftstoffe hochpräzise ermittelt und mit Benzin verglichen werden. Mit steigendem DMC/MeFo-Anteil nimmt die Klopfestigkeit proportional zu, sowie die NO_x -Emissionen ab. Ein ähnlicher Effekt zeigt auch eine Beimischung von MeFo zu Alkylatbenzin. Letzteres kann als synthetisch produziertes Benzin betrachtet werden, dass gegebenenfalls eine höhere Rückwärtskompatibilität zur Bestandsflotte aufweist. Die besten Ergebnisse konnten mit 100 % Oxygenatkraftstoff erzielt werden. Dabei ist es von sekundärer Bedeutung, ob MeFo zu DMC oder MeOH gemischt wird. Ein möglichst hoher MeFo-Anteil ist aus motorischer Sicht wünschenswert, da MeFo aufgrund seiner hohen Volatilität die Gemischbildung begünstigt. Im Projekt stellt sich ein Kraftstoff bestehend aus 65 Vol.% DMC und 35 Vol.% MeFo ($\text{C}_{65}\text{F}_{35}$) als vielversprechend heraus. Mit diesem können Partikelemissionen im Höchstlastpunkt im Vergleich zu Benzin um den Faktor 100 reduziert werden. Gasförmige Schadstoffemissionen können auch am Einzylindermotor mit einem herkömmlichen Dreiwegekatalysator nahezu vollständig konvertiert werden. Am Einzylinder konnte auch die extreme Klopfestigkeit von $\text{C}_{65}\text{F}_{35}$ bzw. MeOH nachgewiesen werden. Spitzendrücke von 140 bar konnten ohne Klopfen bei optimaler Schwerpunktslage mit einem Verdichtungsverhältnis von 15 und 19 bei 17 respektive 15 bar indiziertem Mitteldruck erreicht werden. Der indizierte Wirkungsgrad in diesen Punkten steigt von 37 % für Benzin auf über 40 % für $\text{C}_{65}\text{F}_{35}$. Eine weitere Verbesserung des Einzylindermotors wird durch die Anpassung des Zylinderkopfes erreicht. Entwicklungsziel ist eine Steigerung der Brenngeschwindigkeit durch eine erhöhte Tumble- / Drallströmung. Um gleichzeitig die Kosten für eine mögliche Serienproduktion zu minimieren wird das Einlassventil auf die Größe des Auslassventils reduziert. Dadurch sinkt die unterschiedliche Teileanzahl am Einzylindermotor erheblich. Eine Reduzierung des Kanaldurchmessers ist möglich, da im Kraftstoff bereits 50 % Sauerstoff enthalten ist und daher der Mindestluftbedarf von 14,2 auf 4,6 reduziert ist. Mit der geometrischen Verkleinerung des Kanals ist auch eine Bauraumreduktion einhergehend. Durch die simulativ optimierte Kanalgeometrie kann die Brenngeschwindigkeit erhöht werden. Die Ladungswechselerluste steigen leicht an, werden aber durch die höhere Brenngeschwindigkeit kompensiert. Mit einem Verdichtungsverhältnis von 15 und dem optimierten Zylinderkopf lässt sich der Wirkungsgrad über den Lastbereich des Motors gegenüber der Benzin Referenz um 5 % (rel.) steigern.

Zur virtuellen Motorauslegung für synthetische Kraftstoffe und zur Erschließung der vielversprechenden Potentiale wurden Simulationsmodelle am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) entwickelt, validiert und in gängigen Entwicklungswerkzeugen der Forschung und Industrie integriert. Die Modelle und deren Entwicklung liefern ein tiefgehendes Verständnis der ablaufenden Phänomene im Brennraum. Nicht nur die physikalischen Einflüsse des veränderten Einspritzverhaltens auf die innerzylinderische Strömung und Kalorik werden nachgebildet, sondern die reaktionskinetischen Einflüsse der Kraftstoffe auf Brennverlauf, Klopfverhalten und die NO_x -Entstehung werden auch beruhend auf dem Verbrennungskinetik-Mechanismus, entwickelt am Institut für Technische Verbrennung (ITV) der RWTH Aachen, prädiktiv abgebildet. Mit Hilfe der etablierten Simulationsmethodik wurden unterschiedliche Motorkonzepte für sowohl Pkw- als auch Lkw-Anwendung erarbeitet und auf Basis von Motorkennfeldern sowie in realen Fahrzyklen bewertet. Der Fokus liegt auf der Mischung aus DMC und MeFo volumetrisch zu 65 % / 35 % (C65F35) und einem Benzin-Blendkraftstoff mit 85 % Benzin und 15 % MeFo (G85F15). Die Konzeptrechnungen zeigen, dass die Umrüstung eines modernen Pkw-Ottomotors auf den Kraftstoff C65F35 oder G85F15 in vielen Hochlast-Betriebspunkten Effizienzvorteile bietet, auch wenn die Motorkonstruktion nicht verändert wird. Durch den fortgesetzten Einsatz zielgerichteter Maßnahmen wie Downsizing, variabler Verdichtung und Magerbrennverfahren ist ein Wirkungsgradpotenzial von bis zu 10 % verglichen mit dem konventionellen Ottokraftstoff in einem realen Fahrzyklus möglich. Mit einer zusätzlichen Maßnahme wie aktiver Vorkammerzündung zur Steigerung der Turbulenz bei Verbrennung kann die Wirkungsgradsteigerung sogar bis zu 16 % betragen. Die rohen NO_x -Emissionen von C65F35 sinken im Magerbetrieb auf das Niveau eines Dieselmotors, wobei Abgasnachbehandlungskonzepte (NO_x -Speicherkatalysator und

Abbildung 5
Gegenüberstellung der
Kennfelder von Benzin-Basis-
motor (links) und Hocheffizienz-
konzept für C65F35 (rechts)



SCR System) es ermöglichen, die Emissionen deutlich unter Grenzwert zu halten. Im weiteren Schritt wird die Eignung von C65F35 in Schwerlastanwendungen demonstriert. Es kann gezeigt werden, dass der Kraftstoff auch für diesen Bereich geeignet ist und bei deutlich geringerer Motorkomplexität hinsichtlich Turboaufladung und Abgasnachbehandlung an die Effizienz von Diesel-Motorenkonzepten heranreicht, wodurch der Kraftstoff C65F35 eine attraktive Komponente für zukünftige Ottomotoren werden kann.

Neben den Grundlagenuntersuchungen am Einzylinder-Forschungsmotor wurde der Betrieb von DMC/MeFo in einem modernen Ottomotor erprobt. Hierfür ist die Einspritzmenge pro Hub im Motorsteuergerät anzupassen. Hintergrund ist der Unterschied im Heizwert von DMC/MeFo, welcher im Vergleich zu Ottokraftstoff geringer ist. Die Untersuchungen im statischen Motorkennfeld zeigten mit DMC/MeFo um bis zu 99 % (rel.) verringerte Partikelemissionen entlang der Vollastkurve, im Vergleich zum Motorbetrieb mit Ottokraftstoff. Die Ergebnisse vom Einzylindermotor konnten somit auch auf den Vollmotor übertragen werden. Eine Gemischanreicherung, wie es bei herkömmlichen Ottomotoren in der Vollast üblich ist, entfällt mit DMC/MeFo. Dies wirkt sich einerseits positiv auf die CO-Emissionen und andererseits positiv auf den Kraftstoffverbrauch aus. Über das gesamte Motorkennfeld konnte der stöchiometrische $\lambda = 1$ -Betrieb umgesetzt werden, wodurch die Verwendung des Standard Katalysators ohne Einschränkung gegeben war. Generell zeigt sich, dass serienmäßige Abgasnachbehandlungstechnik als der aus der Serie stammende Versuchsmotor mit geringen Anpassungen für den Betrieb mit DMC/MeFo geeignet sind. Damit das Potenzial der C_1 -Oxygenate voll ausgeschöpft werden kann, müssen neben der Software jedoch auch die Hardwarekomponenten angepasst werden. Neben dem statischen Motorbetrieb wurde der Vollmotor auch in dynamischen Zyklen wie dem zertifizierungsrelevanten WLTC und einem aus dem praktischen Fahrbetrieb (RDE) stammenden Zyklus betrieben. Die nachstehende Tabelle zeigt einen relativen Vergleich zwischen DMC/MeFo und Benzin für den Wirkungsgrad im Zyklus, sowie die unterschiedlichen Emissionen.

Tabelle 1
Vergleich Rohemissionen
in dynamischen Zyklen
DMC/MeFo zu Benzin

DMC/MeFo zu Benzin rel. [%]		RDE	WLTC
Eff. Wirkungsgrad	[%]	+ 2,5 %	- 0,6 %
PN	#/km	- 89,4 %	- 78,4 %
NO _x	g/km	+ 60,0 %*	- 80,7 %
CO	g/km	- 83,5 %	- 49,6 %
THC	g/km	+ 2,7 %	- 1,8 %
CH ₄	g/km	- 46,2 %	- 51,4 %

* unzureichende Lambda-Regelung unter Verwendung von DMC/MeFo
als Ursache für die hohen NO_x-Emissionen festgestellt

Der Nachweis des Emissionsvorteils von C₁-Kraftstoffen gegenüber herkömmlichen Ottokraftstoff im stationären und dynamischen Betrieb konnte erbracht werden. Hinsichtlich des Wirkungsgrades ist mit DMC/MeFo ein positiver Trend erkennbar. Insbesondere bei hohen Lasten stellt sich im Vergleich zu Ottokraftstoff ein höherer Wirkungsgrad ein. Dies lässt sich auf die Klopfresistenz von DMC/MeFo zurückführen. Ein darüber hinaus gehender Wirkungsgradgewinn wurde durch den Bauteilschutz der serienmäßig verbauten Motorbauteile begrenzt. Das hier aufgezeigte Potenzial erforderte die Auslegung eines Hochverdichtungskonzeptes für den verwendeten Ottomotor. Neben verstärkten Triebwerkskomponenten wurden neu entwickelte Kolbendesigns eingesetzt. Dadurch konnte das Verdichtungsverhältnis auf $\epsilon = 15:1$ erhöht werden. Resultierend stellte sich ein absoluter Wirkungsgrad von 41 % bei 2500 1/min ein, während der Wirkungsgrad mit Ottokraftstoff im selben Betriebspunkt bei 36,4 % liegt. Zusätzlich zum Hochverdichtungskonzept wurden alternative Zündverfahren, wie passive Vorkammerkerzen und ein Raumzündsystem getestet. Damit konnte der Versuchsmotor im DMC/MeFo-Betrieb bis zu einer Magerlaufgrenze von $\lambda = 1.5$ sicher betrieben und der Wirkungsgrad nochmals gesteigert werden.

Ein wichtiger Schwerpunkt der Kraftstoffforschung im analytischen Bereich war die Untersuchung der Hydrolysestabilität. Diese ist vor allem für Mischungen mit Methylformiat relevant, da dieses zu Hydrolyse neigt. Bei der Hydrolyse von Methylformiat reagiert es mit Wasser zu Methanol und Ameisensäure. Eine Mischung aus 65 Vol.% Dimethylcarbonat mit 35 Vol.% Methylformiat (C65F35) erwies sich in Versuchen als hygroskopisch, was der Hydrolysethematik eine besonders hohe Relevanz gab. Die Analytik des Hydrolysezustands ist weiterhin eine große Herausforderung. Elektrochemisch konnten mithilfe der ILSB-Methode und Titration qualitativ Effekte von Temperatur und Wassergehalt auf unterschiedliche Mischungen gezeigt werden. Es konnte erstmals gezeigt werden, dass elektrochemische Messungen, zur Bestimmung des $\text{pH}_{\text{abs}}^{\text{H}_2\text{O}}$ der Ameisensäure, in Kraftstoffmischungen prinzipiell möglich sind. Die genannten Effekte erfordern jedoch eine weitere Verfeinerung und Anpassung der Methode, um praxisnahe Messungen und eine, bisher noch nicht mögliche, quantitative Aussage über den Hydrolysezustand einer Probe zu ermöglichen.

Weiterhin wurden Hardware-in-the-Loop-Tests der wesentlichen Komponenten des Kraftstoffeinspritzsystems durchgeführt. DMC-MeFo-Mischung wurde mit standardisierten, marktüblichen Komponenten getestet, um die Kompatibilität des Kraftstoffs zu überprüfen. Der Kraftstoff wirkte sich in den Tests kritisch auf den Betrieb der Hochdruckpumpe (HDP) aus. Diese begann nach einer Laufzeit von 50h zu lecken. Die Zumischung von Ethanol scheint nach der aktuellen Datenlage einen stabilisierenden Einfluss zu haben. Unter Beimischung von 5 % Ethanol wurde ein HDP-Ausfall vermieden und die Prüfung erfolgreich abgeschlossen.

2.3.3 Ausblick

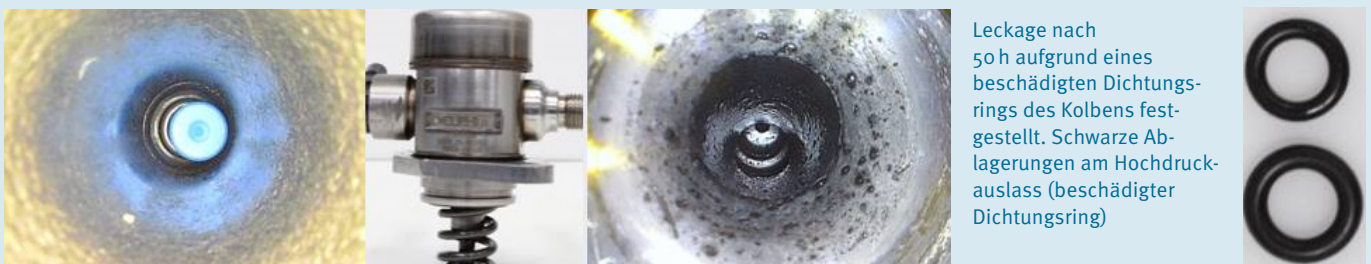
Die Untersuchungen zeigen in Übereinstimmung mit der Fachliteratur, dass sauerstoffhaltige Kraftstoffe unter besonders geringer Rußentwicklung verbrennen. Dieser Effekt führt im Motor zu niedrigen bis kaum messbaren Emissionen bei Partikelmasse und Partikelanzahl. Diese Eigenschaft ermöglicht bislang nicht erreichbare Betriebsmodi der Verbrennungskraftmaschine (hohe Abgasrückführung, hohe Dynamik, extreme Umgebungsbedingungen) unter besonders geringer Freisetzung von anderen Emissionskomponenten wie Stickoxiden. Eine geeignete Mischung von DMC und MeFo hat sich als gut einsetzbarer Kraftstoff erwiesen, der die erwarteten Potentiale an seriennahen Motoren praktisch nutzbar macht. Um alle Potentiale auszunutzen, müssen Motoren jedoch gezielt auf den neuen Kraftstoff abgestimmt werden. Dies umfasst Anpassungen von Hardware und Software, so dass eine Kompatibilität mit Bestandsfahrzeugen mit C₁-Oxygenaten nicht gegeben ist.

Auch Methanol selbst eignet sich für bestimmte Anwendungen als Kraftstoff und weist eine ähnlich hohe Klopffestigkeit wie DMC und MeFo auf. Geeignete Schutzmaßnahmen vorausgesetzt, kann es in der Zukunft eine wichtige Rolle als Motorenkraftstoff spielen. Insbesondere Anwendungen in der Schifffahrt werden bereits auf Methanol umgestellt, so dass weitere Forschungen zur Ermittlung sinnvoller Einsatzfelder äußerst vielversprechend sind – insbesondere LKW mit hocheffizienten Ottomotoren sind ein lohnender Untersuchungsgegenstand.

Die im Projekt erfolgten Blenduntersuchungen zeigen, dass eine Zumischung von DMC und MeFo zu konventionellem Ottokraftstoff aus technischer Sicht nicht ohne weitere Entwicklungen von Analysetechnik und Additiven möglich ist, um die Kraftstoffstabilität quantitativ zu beurteilen und sicherzustellen. Auch Mischungen von Methanol mit MeFo zeigten teils kritisches Verhalten im Komponententest (siehe [Abbildung 6](#)), so dass an dieser Stelle eine weitere Untersuchung solcher Mischungen nicht sinnvoll erscheint.

Abbildung 6

Ablagerungsbildung in HDP (links) mit M85MeFo15; Aufquellen des O-Rings (rechts) mit M85MeFo15



Leckage nach 50 h aufgrund eines beschädigten Dichtungs-rings des Kolbens festgestellt. Schwarze Ablagerungen am Hochdruckauslass (beschädigter Dichtungsring)

Für zukünftige Forschungen zu neuen Otto-Kraftstoffen für PKW sollte daher synthetisches Benzin stärker in den Fokus genommen werden. Herstellbar aus dem C₁-Kraftstoff Methanol weist es eine ähnliche Zusammensetzung wie konventionelles Benzin auf und ist daher für Bestandsfahrzeuge geeignet. Der Entwicklungsbedarf besteht hier jedoch in der Verbesserung der Qualität, vor allem hinsichtlich der Vermeidung von Partikelemissionen oder der Verbesserung der Klopffestigkeit, damit die Motoren bei hoher Effizienz und geringen Schadstoffemissionen betrieben werden können.

2.3.4 Publikationen

J. Binder, O. Krecker, C. Kraus, M. Jaensch, G. Wachtmeister, Analysis of the Piston Group Friction in a Single-Cylinder Gasoline Engine When Operated with Synthetic Fuel DMC/MeFo. SAE Technical Paper Series, SAE International, 2022

S. Blochum, F. Fellner, M. Mühlthaler, M. Härtl, G. Wachtmeister, N. Yoneya, H. Sauerland, Comparison of Promising Sustainable C₁-Fuels Methanol, Dimethyl Carbonate, and Methyl Formate in a DISI Single-Cylinder Light Vehicle Gasoline Engine. SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Digital Summit, 2021

S. Blochum, B. Gadomski, M. Retzlaff, F. Thamm, C. Kraus, M. Härtl, R. Gelhausen, S. Hoppe, G. Wachtmeister, Potential Analysis of a DMC/MeFo Mixture in a DISI Single and Multi-Cylinder Light Vehicle Gasoline Engine. SAE International, 2021

B. Gadomski, M. Retzlaff, F. Thamm, Potential Analysis of a DMC/MeFo Mixture in a 4-Cylinder Light Vehicle Gasoline Engine. In: Liebl, J., Beidl, C., Maus, W. (eds) Internationaler Motorenkongress 2021. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2021, doi:10.1007/978-3-658-35588-3_33

M. Härtl, C. Kraus, M. Jaensch, Electrification and E-Fuels – The Future of Otto- and Diesel-Engines. Wiener Motorensymposium, 2022

M. Irawan-Pieperhoff, S. Feldhoff, Investigation of the change in properties of synthetic fuels developed from recycled CO₂ as a result of ageing. 8th FSC International Conference, 2020

M. Irawan-Pieperhoff, S. Feldhoff, Alterung von synthetischen Kraftstoffen und die Wechselwirkung mit Werkstoffen. 30. Deutscher Flammentag, 2021

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

C. Kraus, P. Jakubec, S. Girhe, F. Fellner, M. Härtl, M. Jaensch, G. Wachtmeister, H. Pitsch, 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, SAE International, 2022

M. Mühlthaler, S. Blochum, A. Stadler, M. Härtl, G. Wachtmeister, A. Miyamoto, H. Sauerland, Optical Investigations of an Oxygenated Alternative Fuel in a Single Cylinder DISI Light Vehicle Gasoline Engine. SAE International, 2021

C. Wagner, M.-T. Keskin, M. Grill, C. Liming, S. Blochum, M. Bargende, H. Pitsch, Potential analysis and virtual development of SI Engines operated with DMC+. 20. Internationales Stuttgarter Symposium, Springer Vieweg, 2020

FORSCHUNGSCLUSTER 3

2.4 Systemanalyse

AUTOR*INNEN

SANDRA ADELUNG

JENS ARTZ

RALPH-UWE DIETRICH

JAN HILDEBRAND

LUISA LÓPEZ

YOGA PRANATA RAHMAT

DANIEL REZO

NIKLAS VON DER ASSEN

2.4.1 Zielsetzung

Um neben der rein technologischen Entwicklung alternativer Kraftstoffe auch die Anwendbarkeit hinsichtlich ökologischer, ökonomischer und sozialer Faktoren zu überprüfen, wird eine vielschichtige Systembetrachtung durchgeführt. Im Rahmen dieser Systembetrachtung wird die gesamte Wertschöpfungskette abgebildet – von den »Rohstoffen« Wasser, CO₂ und Strom zur Umwandlung über Elektrolyse sowie den chemischen Verfahren zur Bereitstellung der Einsatzstoffe, über Lager- und Transportaspekte hinweg bis hin zur Nutzung im Kraftfahrzeug. Die neue Ausgestaltung der Wertschöpfungsketten sowie definierte übergeordnete Rahmenbedingungen des Gesamtsystems sind somit wesentliche Grundlage für eine tiefgehende Analyse unter vergleichbaren Voraussetzungen.

Für die Diffusion synthetischer Kraftstoffe als technologische Innovation in einem gesellschaftlichen Mehrebenensystem sind gesellschaftliche Diskurse über Chancen und Risiken und die öffentliche Akzeptanz zentrale Größen. Zur Identifikation aktueller Diskurse um synthetische Kraftstoffe und wesentlicher Faktoren für die Akzeptanzbildung, dienen öffentliche Diskussionsforen mit interessierten Vertreter*innen aus der Zivilgesellschaft, Industrie, Wissenschaft, Politik. Dabei wird beleuchtet, welche Themen im Kontext synthetischer Kraftstoffe aktuell relevant sind und damit verbunden welche Informationsbedarfe und Wissensstände bei unterschiedlichen Akteursgruppen existieren. Die Foren dienen zudem dem Zweck, Forschungs- und Entwicklungsinhalte der Öffentlichkeit transparent und verständlich darzulegen sowie die Diskussionsinhalte wieder in den Forschungsprozess rückzukoppeln.

Darüber hinaus wurde eine übergeordnete Potenzialanalyse von den im Fokus stehenden Oxygenat-Kraftstoffen durchgeführt. Hierbei wurde einerseits bestimmt, welche Mengen in Deutschland oder gegebenenfalls anderen Ländern unter Berücksichtigung von verschiedenen Parametern und Rahmenbedingungen potenziell hergestellt werden könnten (Angebotspotenzial). Andersherum betrachtet können anhand der Potenzialanalyse auch die benötigten Mengen an Grundressourcen ermittelt werden, welche für die Deckung der prognostizierten Nachfrage eines bestimmten Oxygenates in Abhängigkeit der Anwendung als Reinkraftstoff oder als Kraftstoffkomponente (Blend oder Additiv) notwendig wären (Nachfragepotenzial).

Eine Untersuchung der Umweltwirkungen über dem gesamten Lebenszyklus der Oxygenat-Kraftstoffe OME₃₋₅, DMC und MeFo sowie deren Blends ist das Hauptziel der Lebenszyklusanalyse.

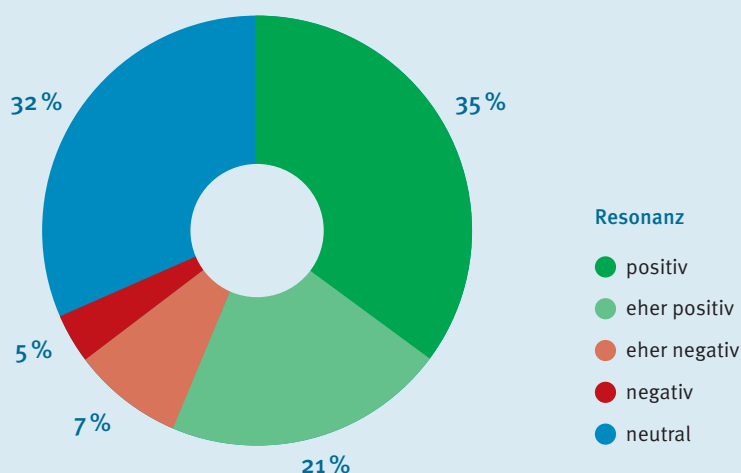
Eine valide und transparente Ermittlung der Prozesseffizienzen und Herstellungskosten zur Erzeugung von OME₃₋₅, DMC und MeFo aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid liegt im Fokus einer techno-ökonomischen Analyse. Wichtiges Augenmerk liegt dabei insbesondere auf der Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, insbesondere im Hinblick auf die angewendete Methodik, Rahmenbedingungen und Skalen.

2.4.2 F&E-Ergebnisse

Im Rahmen von öffentlichen Diskussionsforen sowie als Vorbereitung durchgeführten Interviews und Medienanalysen zeigt sich eine hohe Relevanz des Themas »Synthetische Kraftstoffe« in der breiten Öffentlichkeit. Insbesondere im Kontext der zunehmenden medialen Präsenz verwandter Mobilitätsthemen wie E-Mobilität und Wasserstoff gewinnt auch die Frage um die Potenziale von synthetischen Kraftstoffen für die Energie- und Verkehrswende im gesellschaftlichen Diskurs an Bedeutung. Dabei erfolgt mit steigendem Bekanntheitsgrad im Diskurs eine zunehmende Differenzierung der Anwendungsmöglichkeiten hinsichtlich Schiffs- und Flugverkehr entgegen dem Straßenverkehr. Prinzipiell zeigen die Ergebnisse insgesamt positive Einstellungen und tendenziell hohe Nutzungsbereitschaften bzgl. synthetischer Kraftstoffe. Vor allem für die bestehende PKW-Bestandsflotte wird hier eine große Chance zur Defossilisierung gesehen. Die erwarteten Vorteile bei einer Nutzung synthetischer Kraftstoffe beziehen sich dementsprechend zumeist auf Umweltaspekte wie THG-Einsparungen, erwartete Nachteile beziehen sich mehrheitlich auf die Kosten oder auf Anwendungsaspekte wie z.B. Motorverträglichkeit.

Abbildung 7

Prinzipiell positive Berichterstattung bzgl. SynFuels. Ergebnisse einer Medienanalyse, Zeitraum vom 1.6. bis 5.11.2021, Schlagwort »synthetische Kraftstoffe«; n = 193 Artikel



Ebenso werden Anwendungsmöglichkeiten mit spezifischen Nutzungsanforderungen hinsichtlich Leistung und Einsatzdauer, wie sie in der Landwirtschaft oder im Bausektor bestehen, als zukünftiges Einsatzfeld für synthetische Kraftstoffe gesehen, da die Elektromobilität hier eher keine Alternative darstellt. In diesem Zusammenhang ist auch ein zentrales Ergebnis der Diskussionsformate, dass es bei synthetischen Kraftstoffen und Elektromobilität viel mehr um ein sinnvolles Miteinander als um eine »Entweder/Oder«-Alternativentscheidung geht.

Gleichzeitig wird deutlich, dass es noch große Unsicherheiten in der Bewertung und Einschätzung der Vor- und Nachteile gibt. Dazu zählen vor allem die Höhe der faktischen Umweltwirkungen und die Einschätzungen von verfügbaren Mengen sowie des Zeithorizonts: Wann werden welche Mengen an synthetischen Kraftstoffen wo (Import) zu welchem Preis vorhanden sein bzw. benötigt (Potentiale & Verbrauch)?

Dementsprechend besteht ein großer Bedarf an weiteren Informationen bzw. fundierter Wissensvermittlung. Hierbei spielen die Faktoren Vertrauen und Neutralität eine wichtige Rolle, d.h., inwieweit die Informationen frei sind von partiellen Interessen (z.B. Industrie). Als Konsequenz bedarf es einer transparenten Kommunikation darüber, welche zu Grunde liegenden Annahmen verwendet wurden. Es wird deutlich, dass Kommunikation gleichermaßen den Schlüssel zum gesellschaftlichen Diskurs bzw. zur mehrheitlichen Akzeptanz darstellt, wie auch eine zentrale Herausforderung und mögliche Hürde ist (Stichwort: Lernen aus dem »E10-Kommunikations-Desaster«). Hier kann die Wissenschaftskommunikation eine wichtige Rolle einnehmen.

Ein wichtiger Aspekt für den Markteintritt synthetischer Kraftstoffe und Kraftstoffkomponenten ist die dynamische Betrachtung der technischen Potenziale zur Herstellung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, deren Entwicklung zeitlich abhängig ist. Ein weiterer relevanter Faktor bei der Erhebung der Potenziale ist die Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Angebot und Nachfrage.

Abbildung 8 zeigt exemplarisch das Nachfragepotenzial in Form eines Sankey-Diagramms von OME₃₋₅ in einer 5 Vol.-% Beimischungsquote zu fossilem Diesel im Jahr 2030 in Deutschland. Mit der getroffenen Annahme, dass im Jahr 2030 voraussichtlich noch 29 Mio. t Diesel im Verkehrssektor verbraucht werden, wären 1,9 Mio. t OME₃₋₅ notwendig, welche sich aus 0,4 Mio. t H₂ und 3,2 Mio. t CO₂ produzieren lassen. Zudem wären für die Bereitstellung von H₂, CO₂ und OME₃₋₅ 25 TWh Strom und 5 TWh Wärme notwendig. Diese Analyse wurde in der gleichen Form für DMC und MeFo durchgeführt, mit einem angenommenen Verbrauch von 13 Mio. t Ottokraftstoff in 2030. Für eine Beimischungsquote von 5 Vol.-% MeFo in konventionellem Benzin wären im selben Jahr 7 TWh Strom sowie 4 TWh Wärme für die Bereitstellung von H₂, CO₂ und für die MeFo-Produktion notwendig.

Für die Bestimmung dieser technischen Potenziale wurde ein interaktives Web-Tool³ verwendet, welches gemeinsam von den Projekten NAMOSYN und Kopernikus P2X entwickelt wurde. Eine Variierung verschiedener Parameter ermöglicht hierbei die zielgerechte Ermittlung des Potenzials verschiedener Kraftstoffe und Kraftstoffkomponenten sowie diverser »Power-to-X«-Produkte. Dies betrifft Eingangsgrößen wie u. a. eine Vielzahl an

³ URL des Web-Tools: <http://www.ptx-potenziale.de>

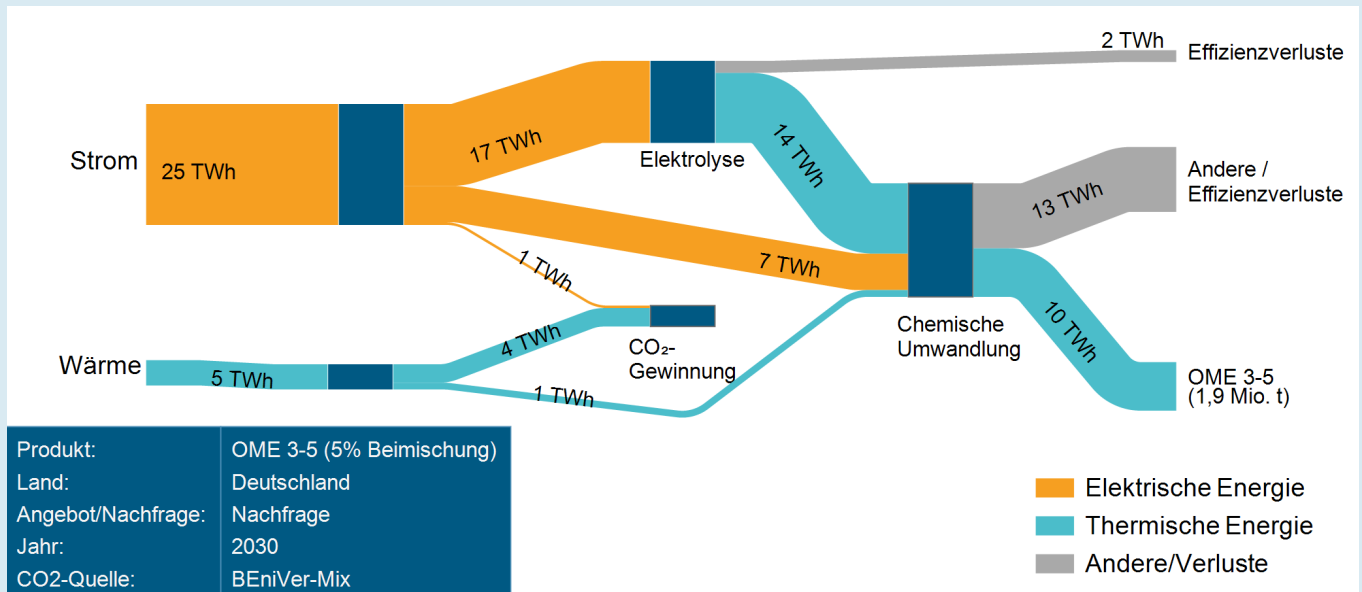


Abbildung 8

Sankey-Diagramm des Angebots von OME₃₋₅ in einer 5 Vol.-% Beimischungsquote in 2030 in Deutschland.

Ländern als Produktionsstandorte, die angestrebten PtX-Produkte sowie jeweils die Strom-, Wasser- und CO₂-Quelle (hier u. a. mit Unterscheidung zwischen Direct Air Capture, industriellen Punktquellen oder biogenen Quellen). Die Potenzialanalyse ist derzeit noch auf die technische Ebene beschränkt, da weder wirtschaftliche noch politische oder soziale Aspekte berücksichtigt wurden.

Als zentrale Umweltwirkung bei der Lebenszyklusanalyse wird der Global Warming Impact über 100 Jahre (GWI₁₀₀) bezogen auf eine zurückgelegte Fahrstrecke von 100 km betrachtet. In [Abbildung 9](#) ist der GWI₁₀₀ für den Lebenszyklus von OME₃₋₅ über die spezifischen CO₂-Emissionen des genutzten Stroms aufgetragen. Dabei werden hier ausschließlich strombasierte Herstellungsrouten betrachtet, die auf den BEniVer-Technologieszenarien (<https://www.energiesystem-forschung.de/forschen/projekte/beniver-begleitforschung>) der Jahre 2018, 2030 und 2050 basieren.

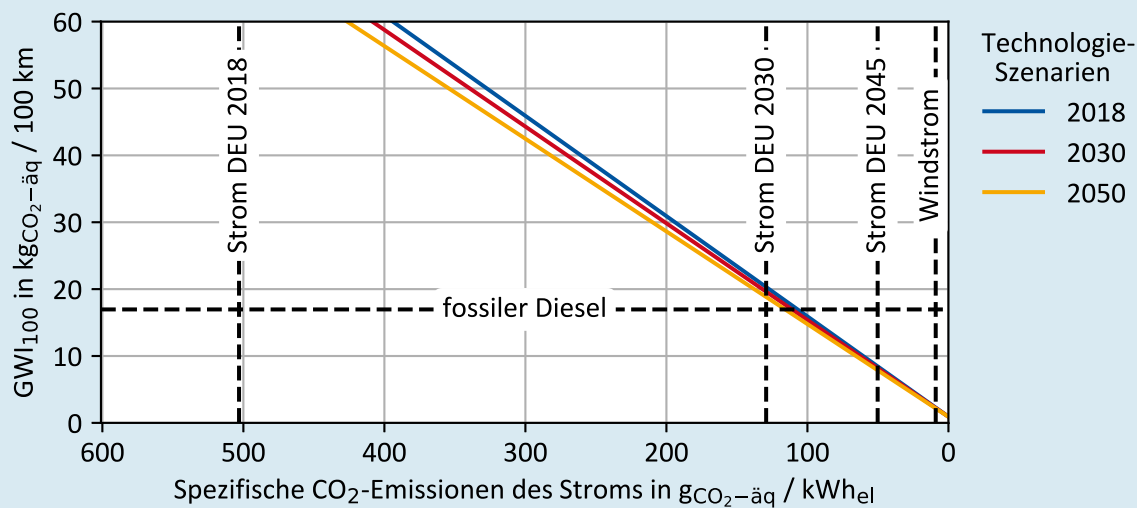


Abbildung 9

Global Warming Impact (GWI₁₀₀) des Lebenszyklus von strom-basiertem OME₃₋₅ aufgetragen über die spezifischen CO₂-Emissionen des zur Kraftstoffherstellung eingesetzten Stroms.

Abbildung 9 zeigt, dass der GWI₁₀₀ für alle Technologieszenarien maßgeblich von den spezifischen CO₂-Emissionen des eingesetzten Stroms abhängt. Des Weiteren können Strom-Grenzemissionen von 112 – 121 g_{CO₂}-äq/kWh_{el} bestimmt werden, für die OME₃₋₅ den gleichen GWI₁₀₀ aufweist wie fossiler Diesel. Die Einordnung der Grenzemissionen in die deutschen Stromszenarien aus BEniVer und ein Windstromszenario zeigt, dass OME₃₋₅ den GWI₁₀₀ gegenüber Diesel senken kann, wenn sehr sauberer Strom zur Herstellung genutzt wird (vgl. Szenarien DEU 2050 und Windstrom). Andererseits wird deutlich, dass der Einsatz von OME₃₋₅ in den deutschen Stromszenarien für 2018 und 2030 zu einem Emissionsanstieg gegenüber fossilem Diesel führt.

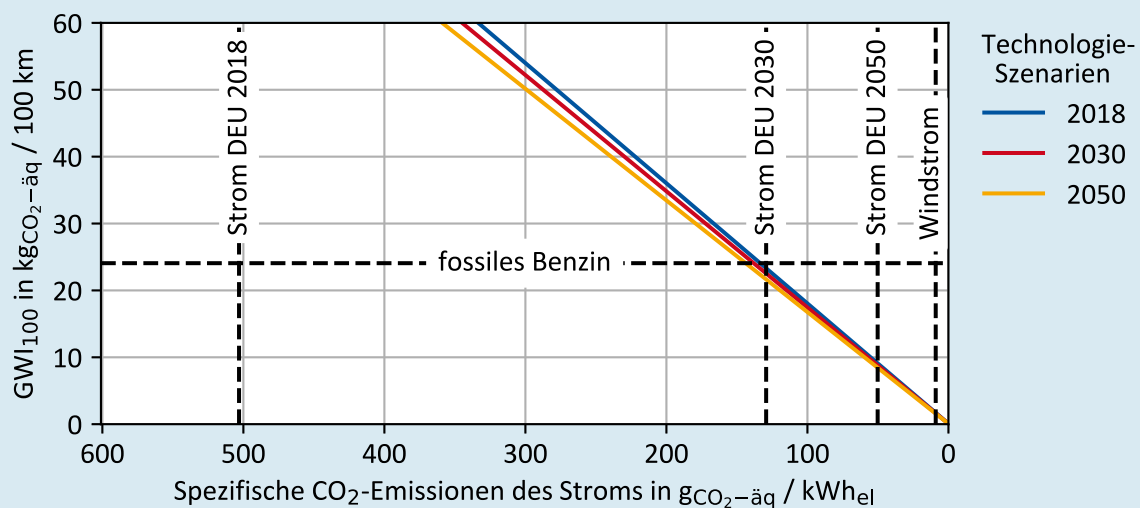


Abbildung 10

Global Warming Impact über 100 Jahre (GW_{I100}) eines Blends aus 65 vol. % DMC und 35 vol. % MeFo aufgetragen über die spezifischen CO₂-Emissionen des zur Kraftstoffherstellung eingesetzten Stroms.

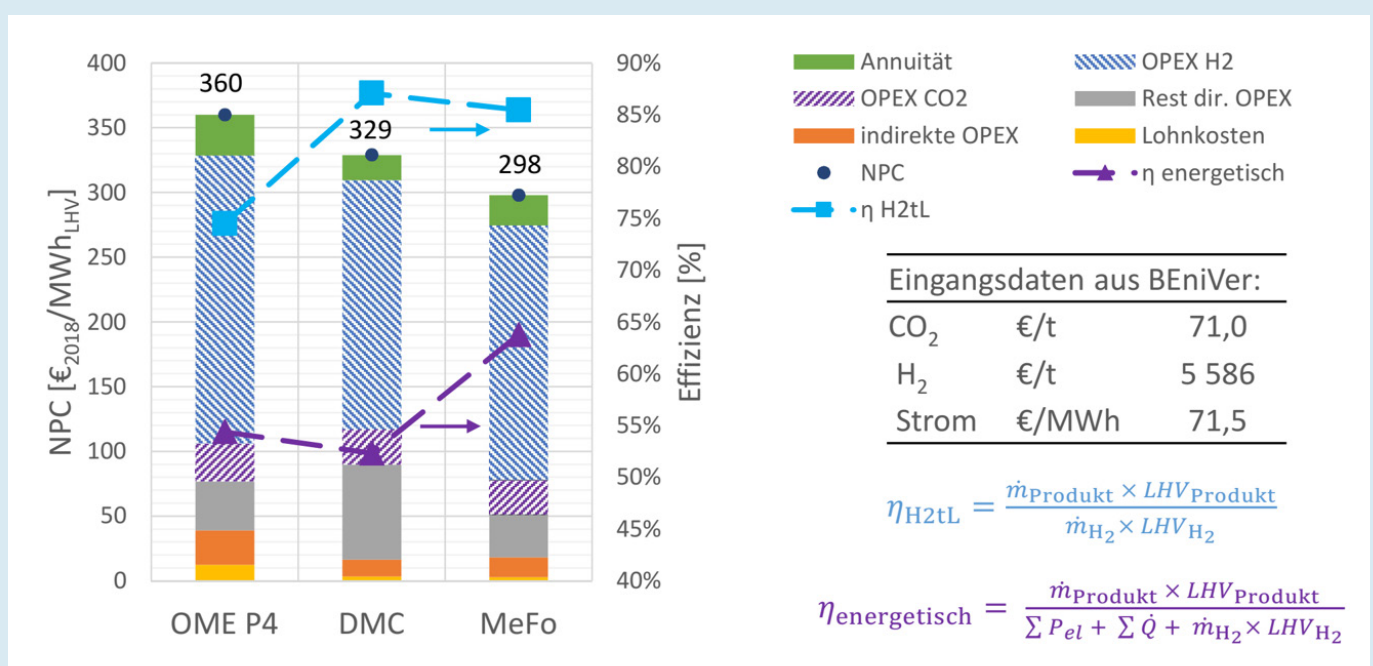
Die Untersuchung des GW_{I100} für einen Blend von 65 vol. % DMC und 35 vol. % MeFo zeigt ein ähnliches Bild zu OME₃₋₅. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in [Abbildung 10](#) zusammengefasst.

Neben dem GW_{I100} wurden auch die Partikelbildung und die Photochemische Oxidantienbildung untersucht. Beide Umweltwirkungen sind maßgeblich von Partikel- bzw. Stickoxidemissionen abhängig, die während der Kraftstoffherstellungs- und Nutzungsphase im PKW auftreten. Für die Nutzungsphase aller untersuchten Oxygenate kann eine Reduktion dieser beiden Umweltwirkungen gegenüber der jeweiligen fossilen Referenz identifiziert werden, die aus der saubereren motorischen Verbrennung der Oxygenate resultiert.

Im Rahmen der Techno-ökonomischen Analyse wird zunächst eine Prozesssimulation in Aspen Plus®, basierend auf experimentellen Projektergebnissen, experimentellen Ergebnissen von externen Kooperationspartnern sowie Literaturdaten, erarbeitet. Auf Basis dieser Fließbildsimulation, unter Berücksichtigung von externen Rahmenannahmen (Begleitforschung Energiewende im Verkehr BEniVer) und mithilfe des DLR Tools TEPET (zusätzliche Datenbankerweiterung im Rahmen des Projekts) werden anschließend die Herstellungskosten für die drei zu untersuchenden Oxygenate ermittelt. Im Rahmen der Untersuchungen zur OME₃₋₅-Synthese werden vier verschiedene Prozessoptionen techno-ökonomisch analysiert und verglichen (siehe Publikation Mantei et al. (2022)). Als Ergebnis der Studie wird die trockene Formaldehydsynthese mit Zwischenschritt über die Methylalsynthese zur weiteren Analyse und zum Scale-up auf 1.000 kt/a ausgewählt. Die Ergebnisse für die drei Oxygenatsynthesen sind in [Abbildung 11](#) zusammengefasst. Die Wasserstoffkosten stellen für alle Syntheserouten den Hauptkostentreiber dar. Der größte energetische Wirkungsgrad wird bei der MeFo-Synthese erzielt, wodurch sich wiederum die geringsten Herstellungskosten von 298 €₂₀₁₈/MWhLHV ergeben. Im direkten Vergleich zeigt sich bei DMC eine größere H₂tL Effizienz (Energieinhalt im Produkt bezogen auf den Energieeintrag in Form von Wasserstoff, siehe Gleichung in [Abbildung 11](#)) wodurch der wertvolle Wasserstoff besser genutzt wird. Hieraus lassen sich auch die günstigeren Herstellungskosten von DMC (329 €₂₀₁₈/MWhLHV) gegenüber OME₃₋₅ (360 €₂₀₁₈/MWhLHV) erklären.

Abbildung 11

Ergebnisse der techno-ökonomischen Analyse für 100 kt/a Oxymethylenether (OME₃₋₅), Dimethylcarbonat (DMC) und Methylformiat (MeFo).



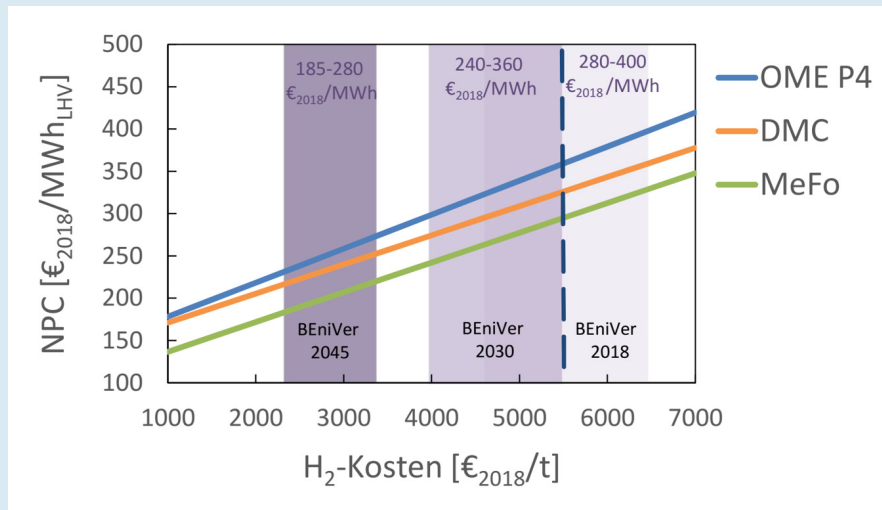


Abbildung 12
Perspektivische
Herstellungskosten
in Abhängigkeit
der Wasserstoffkosten.

Zusätzlich wurden im Rahmen der Untersuchungen lokale Sensitivitätsanalysen bezüglich der relevantesten Eingangsparameter durchgeführt – die Wasserstoffkosten bleiben hierbei nach wie vor der Hauptkostentreiber. Mit sinkenden Wasserstoffkosten sinken dementsprechend auch die Herstellungskosten signifikant, wobei die generelle Einordnung entlang der Herstellungskosten ($\text{MeFo} < \text{DMC} < \text{OME}$) erhalten bleibt (siehe [Abbildung 12](#)).

2.4.3 Ausblick

Der Fokus der Potenzialanalyse in NAMOSYN wurde auf Kraftstoffkomponenten gelegt, ohne den Einfluss der Herstellung von weiteren zukünftig relevanten PtX-Produkten einzubeziehen. Hinsichtlich des Bezugs von H_2 und EE wird es eine Konkurrenz mit diesen Produkten geben, die somit das Angebotspotenzial der PtX-Kraftstoffe limitieren wird. Aufgrund der verhältnismäßig niedrigen EE-Potenziale werden die Potenziale der betrachteten synthetischen Kraftstoffe bzw. Kraftstoffkomponenten in Deutschland daher eher als gering eingeschätzt. Stattdessen kann der grüne Wasserstoff in anderen Ländern mit höheren EE-Potenzialen produziert und exportiert werden. Offen bleibt die Frage, welcher Teil der Wertschöpfungskette in Deutschland stattfinden wird (z. B. Produktion der Oxygenate). Produktbezogene Rohstoff- und Energie-Bedarfe für die einzelnen PtX-Produkte in verschiedenen Ländern lassen sich ebenfalls über das erarbeitete Tool ableiten.

Das Emissionsminderungspotenzial gegenüber der fossilen Referenzkraftstoffe Diesel und Benzin beläuft sich unter Annahme einer idealisierten rein windbasierten Strombereitstellung auf 92 % für OME₃₋₅ bzw. 93 % für DMC/MeFo.

Unter Berücksichtigung der generischen, perspektivischen Wasserstoffkosten für das Jahr 2045 (aus den BEniVer Rahmenannahmen, siehe [Abbildung 11](#)) ergibt sich eine deutliche Reduktion in den Herstellungskosten im Vergleich zum Basisjahr 2018: $MeFo = 185 \text{ €}_{2045, \min} / MWh_{LHV} < DMC = 215 \text{ €}_{2045, \min} / MWh_{LHV} < OME \approx 230 \text{ €}_{2045, \min} / MWh_{LHV}$ ⁴.

Eine mögliche Steigerung des Wirkungsgrades und/oder eine Verringerung der Kosten wäre durch alternative Routen denkbar (z. B. Oxydative Dehydrierung von MeOH oder Hydrokondensierung von CO_2 mit MeOH zu Erzeugung von MeFo). Der Einsatz von Wärmepumpen bietet zusätzlich das Potential zur Effizienzsteigerung und damit Potential zur Kostenreduktion (CAPEX vs. OPEX).

Die Integration gesellschaftlicher Perspektiven durch die diversen Diskussionsformaten machte den Mehrwert des Akteursgruppen-übergreifenden Austauschs und des Perspektivenwechsels für das Verständnis der gesellschaftlichen Dimension von synthetischen Kraftstoffen deutlich. Die angesprochenen Herausforderungen hinsichtlich der Wissenskommunikation unter den bestehenden Unsicherheiten bzgl. der Umweltwirkungen oder Potentialabschätzungen werden auch für den weiteren Diskurs zu meistern bleiben. Aus der Perspektive der Akzeptanzforschung sind zukünftig verstärkte Analysen konkreter Anwendungsbeispiele von Interesse, z. B. in regionalen Settings, um so spezifische Aspekte der Nutzungsakzeptanz als Ergänzung zu den gesellschaftlichen Diskursen zu beleuchten.

⁴ 1 MWh_{LHV} entspricht etwa 118 Liter Benzin und 102 Liter Diesel.

2.4.4 Publikationen

Potenzialanalyse Web-Tool: <http://www.ptx-potenziale.de>

Mantei et al., Techno-economic assessment and carbon footprint of processes for the large-scale production of oxymethylene dimethyl ethers from carbon dioxide and hydrogen, 2022,

Völker et al., Blend for all or pure for few? Well-to-wheel life cycle assessment of blending electricity-based OME₃₋₅ with fossil diesel, 2022,

Details zur technischen, ökonomischen und ökologischen Analyse

Mantei et al.(2022), Techno-economic assessment and carbon footprint of processes for the large-scale production of oxymethylene dimethyl ethers from carbon dioxide and hydrogen. Sustainable Energy & Fuels, Issue 3 (DOI: 10.1039/D1SE01270C)

Publikation zur techno-ökonomischen Analyse der DMC in Kooperation mit der TU Delft (zurzeit in Erstellung): **A. Raghunath, S. Maier, A. Bansode, R. Dietrich, A. Urakawa (2022)**: Techno-economic analysis of industrial dimethyl carbonate production from CO₂ and methanol with 2-cyanopyridine as dehydrant. Manuscript in preparation.

Hildebrand et al. (in Vorbereitung): Gesellschaftliche Akzeptanz von synthetischen Kraftstoffen.

Ausblick

AUTOR*INNEN

ISABEL KUNDLER

PHILIP RUFF

Nach drei Jahren intensiver Forschung des NAMOSYN-Konsortiums ermöglichen die Ergebnisse der Studien eine qualifizierte wissenschaftliche Einschätzung des Potentials sauerstoffhaltiger Kraftstoffe im Labor und in der Praxis. Insgesamt haben die Oxygenat-basierten Kraftstoffe besonderes Potential, nicht nur global, sondern aufgrund ihrer rußfreien Verbrennung auch lokal emissionsarm Energie bereitzustellen. Diesem enormen Potential der Reinkraftstoffe stehen teilweise Einschränkungen in der Materialverträglichkeit kraftstoffführender Komponenten im Kontakt mit den polaren Oxygenaten gegenüber.

Für die Anwendung als Reinkraftstoff wäre es erforderlich, die Motoren anzupassen. Dazu sind sowohl Adaptionen an der Motorsteuerung (»Mapping«) als auch Nachrüstungen bzw. Austausch verschiedener Komponenten notwendig. Auf den Kraftstoff optimierte Motoren ermöglichen dann jedoch mit fossilen Diesel- und Ottokraftstoffen bisher nicht erreichbare, erwünscht niedrige Emissionswerte, die die gesetzlichen Anforderungen weit übertreffen.

Im Fall einer Zumischung klimaneutraler Oxygenaten zu konventionellen Kraftstoffen, ist die Bestandskompatibilität dieser Kraftstoffe durchaus vorhanden und kann sich auch günstig auf das Verbrennungsverhalten insgesamt auswirken. Dabei sind, abhängig von der Art der Oxygenate Anteile von bis zu 15 Vol. % technisch möglich und erlauben so eine teilweise Ausnutzung der Kraftstoffpotentiale hinsichtlich der globalen und lokalen Emissionsminderung.

Allerdings stehen einem solchen Ansatz aktuell die derzeit geltenden Kraftstoffnormen für Diesel- und Ottokraftstoffe entgegen. Entsprechend der Norm DIN EN 590 sind in Dieselmotoren keine sauerstoffhaltigen Komponenten mit Ausnahme von Fettsäuremethylestern (FAME) zulässig. Gemäß der Norm DIN EN 228 dürfen Ottokraftstoffe zwar einen maximalen Sauerstoffgehalt von 3,7 % (m/m) aufweisen, allerdings ist nur die Zumischung von Monoalkoholen und Ethern erlaubt; Oxygenate wie Methylformiat oder Dimethylcarbonat sind nicht zulässig.

Darüber hinaus müssen in Deutschland zugelassene Kraftstoffe in der jeweils gültigen Fassung der »Zehnten Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen – 10. BImSchV)« aufgeführt sein. Blendkomponenten für fossile Kraftstoffe müssen zwar nicht separat deklariert werden, sie dürfen aber nur zugemischt werden, wenn das fertige Produkt alle in der jeweiligen Norm gestellten Anforderungen erfüllt. Dies schließt z.B. MeFo als Komponente aus, da Ester im Ottokraftstoff nicht erlaubt sind. Dieselmotoren dürfen zwar Kohlenwasserstoffe zugesetzt werden, solange die Grenzwerte der DIN EN 590 eingehalten werden; außer FAME sind aber keine anderen Blendkomponenten erlaubt, OME darf nach der geltenden Norm

nicht beigemischt werden. Um den Weg der Inverkehrbringung z.B. an öffentlichen Tankstellen zu ebnen, müssten diese alternativen Kraftstoffe zunächst in die Normen für Otto- und Diesekraftstoffe als zulässige Komponenten aufgenommen werden.

Da die Verwendung von Oxygenaten als Reinkraftstoff umfangreiche Umrüstungen erfordert bzw. gänzlich neu entwickelte Motorenkonzepte, wird die Anwendung von OME, DMC und MeFo in reiner Form im straßengebundenen Individualverkehr mittelfristig als nicht realistisch eingeschätzt. Hier werden sich zukünftig voraussichtlich die Elektromobilität sowie ggf. bestandskompatible Kraftstoffe auf Fischer-Tropsch- und Methanol-to-Gasoline-Basis durchsetzen, die in beliebigen Verhältnissen mischbar sind und somit eine kontinuierlich fortschreitende, graduelle Substitution fossiler durch erneuerbare Energie ermöglichen, vergleichbar mit dem kontinuierlich immer ‚grüner‘ werdenden Strommix im Netz.

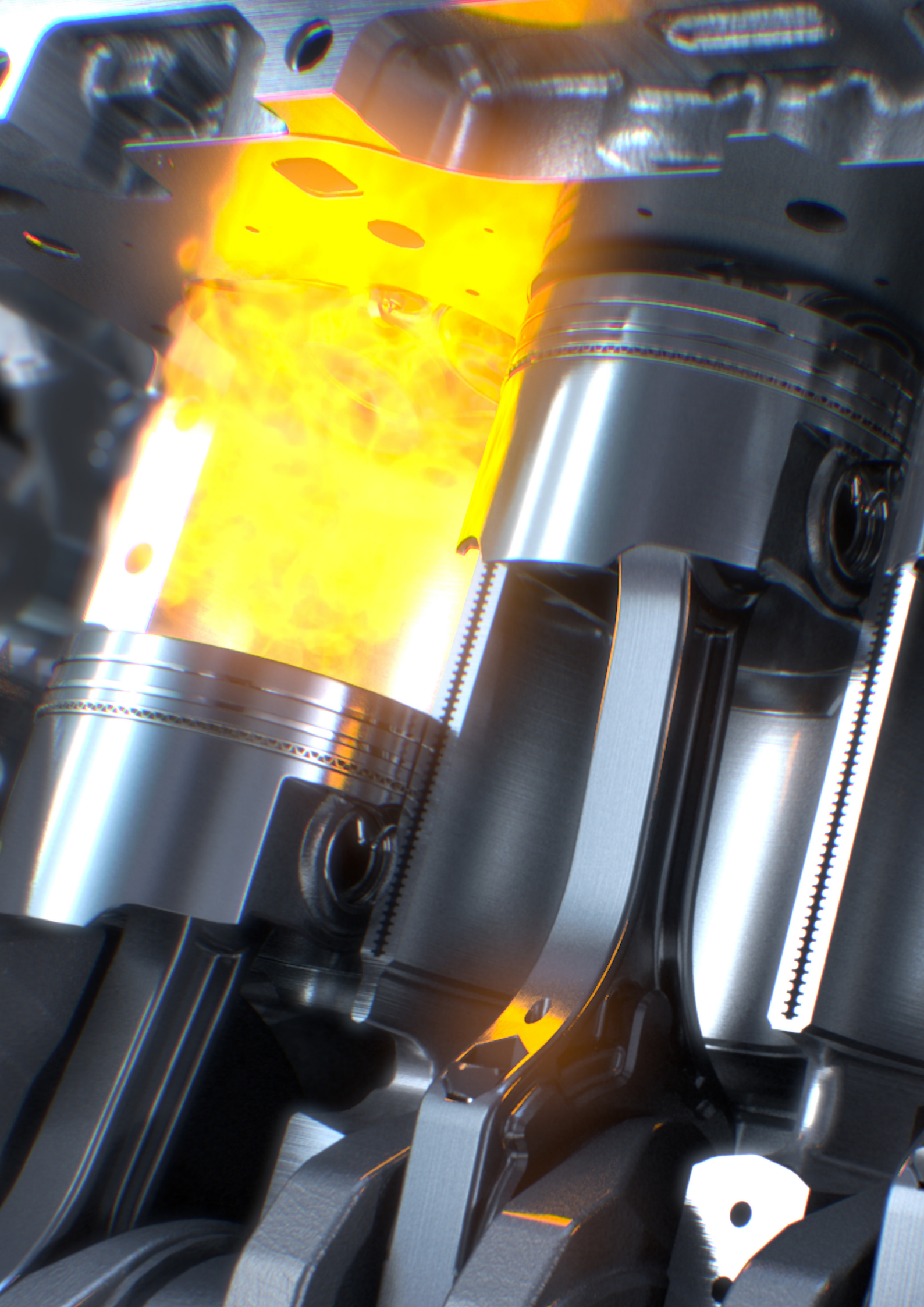
Die positiven Eigenschaften von C₁-Oxygenaten insbesondere hinsichtlich ihres beeindruckenden Emissionsverhaltens könnten zukünftig eventuell für geschlossene Flottenverbände, z.B. Nutzfahrzeuge in urbanen Ballungszentren oder Bau- und Landwirtschaftsmaschinen, in den Anwendungsfokus rücken, wenn in diesen eine technische Anpassung der Motoren vorgenommen wird.

Ein erster notwendiger Schritt für die Markteinführung neuer alternativer Kraftstoffe ist die Normung dieser Produkte, da die Fahrzeugindustrie eine genaue und einheitliche Spezifikation zur Anpassung bzw. Neuentwicklung geeigneter Motoren benötigt. Als Beispiel für diesen Prozess kann die Entwicklung der Kraftstoffnorm DIN/TS 51699 für Oxymethylenether dienen. Diese wurde parallel zu NAMOSYN unter Leitung des Fachausschusses Mineralöl- und Brennstoffnormung (FAM) des Deutschen Instituts für Normung e.V. (DIN) erarbeitet und definiert eine Spezifikation und Prüfmethode, um für alle Anwender gleichbleibende OME-Qualität und Kraftstoffeigenschaften zu garantieren. Eine solche definierte Qualität der Produkte ist die Voraussetzung für die Vergleichbarkeit von Prüfstands- und Feldversuchen, sowohl im Hinblick auf Verbrennungseigenschaften und Materialkompatibilität als auch für die Beurteilung der Emissionen.

Eine weitere Bedingung hierfür sind dabei auch die in NAMOSYN erforschten Verfahren zur nachhaltigen und effizienten Herstellung von Oxymethylenethern, die für eine gleichbleibend hohe Qualität unter Einhaltung der definierten Eigenschaften sorgen. Dabei konnten erhebliche Potentiale für die Synthese aus Methanol und Methanolderivaten identifiziert werden. Vorteilhaft dürfte sich auch auswirken, dass Methanol perspektivisch zunehmend eine entscheidende Rolle als chemischer Speicher für erneuerbare Energie, Basischemikalie, Kraftstoff sowie als Transportmedium für Energie aus grünem Wasserstoff einnehmen könnte.

In NAMOSYN wurde eine Demonstrationsanlage zur Herstellung und Aufreinigung von OME erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Diese stellt mit einer Kapazität von etwa acht Tonnen OME gem. DIN/TS 51699 pro Jahr eine essenzielle Grundlage für weitergehende Untersuchungen zur Skalierung der Technologie in den industriellen Maßstab dar. Der so hergestellte Kraftstoff könnte dann direkt in die motorische Anwendung fließen.

Grundsätzlich bieten diese Moleküle trotz der aktuell eingeschränkten Bestandskompatibilität die Möglichkeit, leicht handhabbare und ungiftige Energieträger auf Basis von grünem Methanol zu erhalten, die im Vergleich zum fossilen Kraftstoff global und lokal besonders umweltfreundlich sind. Auch vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Einschränkungen sollte dieses Potential nicht vergessen werden. Auf lange Sicht sind für bestimmte Anwendungen durchaus angepasste Flotten denkbar. Eine gewisse technologische Vielfalt und diversifizierte Energieimporte sind zwar weniger effizient als eine direkte Stromnutzung, aber könnten zur Resilienz und Robustheit des Energiesystems positiv beitragen.



Projektpartner

WISSENSCHAFTLICHE PARTNER

DECHEMA Gesellschaft für
 Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
 Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
 Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen
 und Fahrzeugmotoren Stuttgart
 Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
 Freiburger Materialforschungszentrum
 Institut für ZukunftsEnergie-
 und Stoffstromsysteme gGmbH
 Karlsruher Institut für Technologie
 Leibniz-Institut für Katalyse e.V.
 OWI Science for Fuels gGmbH
 Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
 Ruhr-Universität Bochum
 RWTH Aachen University
 Technische Universität Darmstadt
 Technische Universität Kaiserslautern
 Technische Universität München

INDUSTRIEPARTNER

ASG Analytik-Service AG
 AUDI AG
 AVL Deutschland GmbH
 BASF SE
 BMW Motoren GmbH
 BP Europa SE
 Clariant Produkte (Deutschland) GmbH
 DBI Gas und Umwelttechnik GmbH
 DEUTZ AG
 Dichtungstechnik Wallstabe & Schneider GmbH & Co. KG
 Evonik Technology & Infrastructure GmbH
 Federal Mogul Burscheid GmbH / TENNECO
 GMA Gesellschaft für Mineralöl-Analytik
 und Qualitätsmanagement mbH + Co. KG
 Linde AG
 MANN + HUMMEL GmbH
 Mitsubishi Power Europe GmbH
 Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG
 Robert Bosch GmbH
 RWE Power AG
 Schaeffler Technologies AG & Co. KG
 Tec4Fuels GmbH
 Umicore AG & Co. KG

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens (FKZ 03SF0566).

Für Beratungen zu Normen und zur Gesetzgebung in Bezug auf die beforschten Kraftstoffe gilt der Dank Herrn Dr. Jürgen Fischer (DIN FAM).



Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe

IMPRESSUM

Herausgeber

Verbundvorhaben NAMOSYN
Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe
Geschäftsstelle / koordiniert von:
DECHEMA
Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
namosyn@dechema.de
www.namosyn.de

Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Philip Ruff

Redaktion

Dr. Isabel Kundler
Dr. Philip Ruff

Gestaltung

Lindner & Steffen GmbH,
www.lindner-steffen.de

Bildnachweis

AdobeStock: © Dodor_Inna (Titel), Artfully-79 (S. 10),
assistant (S. 19), Pathompong (S. 45)

Gefördert vom
Bundesministerium für Bildung und Forschung
(FKZ 03SF0566)

Erschienen am 30. September 2022 in Frankfurt am Main

Nachdruck – auch auszugsweise – nur
mit Genehmigung des Herausgebers.

KOORDINIERT VON



DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.