

6. Tagung der Fuels Joint Research Group am 13. und 14. Juni 2024 in Berlin

KRAFTSTOFFE FÜR DIE MOBILITÄT VON MORGEN

Herausgeber: Jürgen Krahl, Axel Munack, Peter Eilts, Jürgen Bünger





Kraftstoffe für die Mobilität von morgen







6. Tagung der Fuels Joint Research Group am 13. und 14. Juni 2024 in Berlin

KRAFTSTOFFE FÜR DIE MOBILITÄT VON MORGEN

Herausgeber: Jürgen Krahl, Axel Munack, Peter Eilts, Jürgen Bünger





Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2024

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen. 1. Auflage, 2024 Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft. ISBN 978-3-68952-019-9 eISBN 978-3-68951-019-0



Mit welchen Kraftstoffen wird die Mobilität von morgen ermöglicht?

In vielen Fällen wird ein elektrischer Antrieb geeignet sein, bei dem die Energie in Batterien gespeichert wird. Gerade für Anwendungen in der Langstreckenmobilität werden dagegen flüssige oder in Teilbereichen auch gasförmige Energieträger benötigt, um entsprechende Reichweiten zu ermöglichen.

Hier liegt der Fokus der **6. Tagung Kraftstoffe für die Mobilität von morgen**, die am 13. und 14. Juni 2024 in Berlin stattfinden wird, und die von der Fuels Joint Research Group (FJRG) als interdisziplinärer Forschungsgruppe organisiert wird.

Im vorliegenden Tagungsband finden Sie sowohl umfassendere Beiträge als auch Kurzfassungen von zum Nachwuchsförderwettbewerb eingereichten Postern zu diesem Thema. Sie kommen aus den Bereichen der Rahmenbedingungen, der Forschung, der Herstellung und der Anwendung.

Einen großen Einfluss auf die Mobilität der Zukunft haben die technischen, politischen, ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen für zukünftige Kraftstoffe, die auf der Tagung in drei Keynote-Beiträgen aufgespannt werden, von denen einer hier in Kurzform abgedruckt vorliegt.

Die Forschung und die Anwendungen hängen spezifisch von den Mobilitäts- und Anwendungssektoren ab, dies wird beispielsweise für Heavy-Duty Trucks, für Pkw's, für die zukünftige maritime Schifffahrt und für den Schienenverkehr diskutiert. Dies gilt mit wieder besonderen Bedingungen auch für die Landwirtschaft.

In all diesen Bereichen sind nachhaltige Kraftstoffe und Energieträger nötig, wobei gerade für die Langstreckenmobilität die hohe Energie- und Leistungsdichte eine wichtige Randbedingung darstellt. Dies können alternative Kraftstoffe von Biodiesel, Bioethanol und HVO über verschiedene eFuels bis hin zu Wasserstoff und Wasserstoff-Trägern sein.

Ein besonderes Thema sind Anwendungen für kritische Infrastrukturen, bei denen berücksichtigt werden muss, dass die Energieträger auch lange gelagert werden müssen, um dann beispielsweise in Notstromaggregaten sehr verlässlich einen sofortigen Betriebsstart zu ermöglichen.

Weiterhin geht es um die Herstellung von Kraftstoffen der Zukunft, beispielsweise von Biokraftstoffen inklusive der Limitierung der Ressourcen; es geht um Forschung für abfallbasierte Herstellungswege und die Forschung und Entwicklung der eFuel Herstellung. Forschungsfragen und -lösungen werden weiterhin im Bereich der Kraftstoffforschung und Digitalisierung und über neuartige methodische Ansätze zur Verbindung von Simulation und Experimente diskutiert.

Der Tagungsband gibt somit einen guten und aktuellen Überblick über Anforderungen und Entwicklungen für alternative Kraftstoffe wieder.

Die Tagung und der Tagungsband wenden sich an technisch/wissenschaftliche Expertinnen und Experten, betriebliche Entscheider, Vertreter aus Verbänden und Politik sowie an Promovierende und Studierende. Dies soll dazu anregen, auch neue Ideen und Lösungsansätze zu den Herausforderungen in diesem Gebiet zu entwickeln und sie auf den verschiedenen Ebenen von der Forschung bis zur Anwendbarkeit zu diskutieren.

Die Tagungsreihe "Kraftstoffe für die Mobilität von morgen" wird im zweijährigen Turnus von der **Fuels Joint Research Group (FJRG)** organisiert. Die Fuels Joint Research Group ist eine aus Ingenieuren, Naturwissenschaftlern und Medizinern interdisziplinär zusammengesetzte Forschergruppe auf dem Gebiet der Kraftstoffforschung. Im wissenschaftlichen Fokus stehen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Kraftstoffkomponenten, dem Motor und dem Motorenöl sowie der Abgasnachbehandlung insbesondere mit Blick auf die resultierenden Emissionen und deren gesundheitliche Auswirkungen. Die Untersuchung alternativer Kraftstoffe, in der Bandbreite von solchen biogenen Ursprungs (Biodiesel, HVO, Bio-Alkohole, Bio-Methan u.a.) bis zu verschiedenen E-Fuels einschließlich Wasserstoff, eröffnet ergänzend zur Elektromobilität Wege zu einer nachhaltigen Energiebereitstellung für mobile Systeme.

Wir wünschen Ihnen eine fruchtbare Lektüre des Tagungsbandes und – sofern Sie dabei sein können – eine intensive und lehrreiche Teilnahme an der 6. Tagung "Kraftstoffe für die Mobilität von morgen" in Berlin.

Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker

UFOP

vertritt die politischen Interessen der an der Rohstoffproduktion, Verarbeitung und Vermarktung heimischer Öl- und Eiweißpflanzen beteiligten Unternehmen, Verbände und Institutionen. Der Förderauftrag schließt neben der Nahrungs- und Futtermittelverwendung ebenfalls die Nutzung von Rapsöl zur stofflichen und energetischen Nutzung ein. Deshalb fördert die UFOP im Rahmen ihrer Möglichkeiten anwendungsnahe Vorhaben und überdies die ebenso wichtige Netzwerkbildung mit Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft. Die Tagungen der Fuels Joint Research Group sind hierfür eine ideale Plattform, zumal das Programm auch gezielt an Studierende gerichtet ist.

BDBe

Der Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e.V. setzt sich für die Senkung der Treibhausgasemissionen im Verkehr

Die Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP)

durch den Einsatz von Bioethanol als erneuerbare Beimischungskomponente zu Benzin ein. Mit einem gesamtheitlichen Ansatz bilden die Mitglieder des BDBe die gesamte Erzeugungskette vom Acker bis zum Kraftstoff ab. Dabei koordiniert der BDBe die politische Meinungsbildung der deutschen Bioethanolwirtschaft und vermittelt deren Ergebnisse an Politik, Wirtschaft, Wissenschaft, Medien und Öffentlichkeit. Zukunftsorientierte und praxisnahe Fachveranstaltungen wie die der Fuels Joint Research Group tragen zu dieser Meinungsbildung bei und werden daher vom BDBe unterstützt.

VDB

Der Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie (VDB) vertritt die wichtigsten deutschen Biodiesel- und Biomethanhersteller auf na-

tionaler und europäischer Ebene gegenüber Politik und Öffentlichkeit. Er setzt sich für verlässliche Rahmenbedingungen für Biokraftstoffe ein, die eine nachhaltigere Mobilität auch bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ermöglichen. Biodiesel, Bioethanol und Biomethan spielen eine überragende Rolle bei der Minderung des Treibhausgasausstoßes der Antriebsenergie im Straßenverkehr, indem sie in Deutschland 11 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr einsparen. Damit leisten Biokraftstoffe heute den mit Abstand größten Beitrag zur CO₂-Reduzierung im Verkehr. Der VDB unterstützt die FJRG-Tagung und freut sich auf den fachlichen Austausch, nicht zuletzt mit Nachwuchsforschern und Studenten.



BI





MVaK

Flüssige Biokraftstoffe mit einer hohen Treibhausgasminderung sind für den gesamten Verkehrssektor unverzichtbar. Dies ist

Motivation und Verpflichtung zugleich. Gemeinsam müssen wir den Klimabeitrag von Biokraftstoffen weiter steigern und ihre Verwendung optimieren. Möglich wird dies durch die Nutzung zusätzlicher Abfall- und Reststoffe, durch eine bestmögliche Kohlenstoff-Effizienz der eingesetzten Ausgangsstoffe und durch eine zielgerichtete Kraftstoffforschung.

Der Mittelstandsverband abfallbasierter Kraftstoffe e.V. (MVaK) repräsentiert neunundzwanzig Mitglieder, die geeignete pflanzliche Abfall- und Reststoffe, überwiegend gebrauchte Speiseöle sowie Abfallfettsäuren, sammeln, aufbereiten, zu abfallbasiertem und fortschrittlichem Biodiesel verarbeiten oder mit den Ausgangsstoffen und Fertigprodukten handeln. Sitz des Verbandes ist Berlin.

Tecosol

8

Die Tecosol GmbH ist einer der führenden europäischen Produzenten von fortschrittlichen Biokraftstoffen mit hoher Treib-

hausgasminderung. Dies erfolgt in zwei Werken in Ochsenfurt und Wittenberge mit einer Gesamtkapazität von bis zu 300.000 t/y. Neben der Nutzung von Abfall- und Reststoffen zur Herstellung von Fettsäuremethylestern, entwickelt die Tecosol auch neue innovative Kraftstoffe. Ein Team von gualifizierten Ingenieuren und Wissenschaftlern beschäftigt sich seit vielen Jahren in enger Kooperation mit Hochschulen mit der Mobilität der Zukunft.



MVGK



liquid organic energy



Inhaltsverzeichnis

Keynote: Zur Technik zukünftiger Mobilität Marcus Bollig	11
Wasserstoff-Technologien für den Antrieb im schweren Fernverkehr Florian Lindner, Stephan Schraml, Maximilian Weidner, Dominic Hyna, Daniel Teubner, Stefan Buhl, Andreas Broda	12
Kraftstoffe mit erhöhtem erneuerbaren Anteil in einem Emissionsvergleich Hanno Krämer	22
Alternative Fuels for Future Maritime Shipping Johann Wloka, Christian Kunkel, Alexander Knafl	30
OME – Potenziale und Herausforderungen auf dem Weg zum klimaneutralen und schadstofffreien Dieselmotor Alexander D. Gelner	41
Innovative Wege zur CO ₂ -freien Mobilität auf der Schiene durch HVO, Wasserstoff und Ammoniak Mario Lichtenberg, Max Linier	56
eFuels – more than just fuel for sportscars Arne Philipp Siemens	61
Biokraftstoffe – gesetzliche Regelungen zur Förderung und Limitierung des Ressourcenbedarfs Dieter Bockey	63
Verfahrensentwicklung zur Herstellung abfallbasierter Kraftstoffe Anika Sievers, Yasin Incedag, Svenja Iserloth, Thomas Willner	72
eFuels-Herstellung – Chancen und Risiken Lorenz Kiene, Kevin Günther	87
Kraftstoffstrategie für kritische Infrastruktur Sascha Micklich, Andreas Kurtz, Michael Faulde	95
Digitaler Kraftstoffzwilling Georg Klepp	103
Digitaler Kraftstoff-Zwilling in der Praxis Marko Babic	110

9

X-in-the-Loop Concept for the Integration of Simulation and Experiment for Fuel Cell Systems Tancrède Oswald, Lukas Weiß, Michael Wensing	114
Optische Untersuchung der Wasserstoffverbrennung am Einzylinder-Transparentmotor Philipp Borken, Lukas Link, Hauke Hansen, Friedrich Dinkelacker	120
Simulationsbaukasten zur technoökonomischen Bewertung von PtX-Prozessen am Beispiel der Herstellung von Ammoniak als Schiffskraftstoff Sebastian Braukhoff	122
Zünd- und Verbrennungseigenschaften von Ammoniak/Wasserstoff/Luft-Gemischen Jessica Dymke	124
Vergleich alternativer Kraftstoffblends in Bezug auf die Partikelemission im transienten Motorbetrieb Lukas Heinz	126
Zündung magerer H₂/Luft-Gemische mittels turbulenter heißer Freistrahlzündung Jacqueline Höltkemeier-Horstmann	128
Kontinuierliche katalytische Hydrierung und Isomerisierung von Bioölen und Kohlenwasserstoffgemischen Svenja Iserloth	130
Ignition delay time and multi-speciation measurements of ammonia/methanol mixtures in a shock tube Nafi Farzana	132
Zündversuche mit Wasserstoff unter hohem Druck bei Betrachtung des OH-Eigenleuchtens mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera Leopold Seifert	134
Investigation into the oxidation behavior of tetrahydrofuran and isopropanol blends Meenu Sharma, Guanyu Wang	136
Autoren und Autorinnen dieses Bandes	138
Mitglieder der Fuels Joint Research Group	140



Keynote: Zur Technik zukünftiger Mobilität

Marcus Bollig

Mit dem Paket "Fit for 55" will die Europäische Union (EU) ihre Treibhausgasemission bis 2030 um 55 Prozent gegenüber 1990 senken. Dafür wurde in der vergangenen Legislatur eine Vielzahl von Maßnahmen verabschiedet. Aus Sicht der deutschen Automobilindustrie sind dabei vor allem die CO₂-Flottenregulierungen für Pkw, leichte und schwere Nutzfahrzeuge zentral. Damit die Defossilisierung des Straßenverkehrs gelingen kann, spielen darüber hinaus die "Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe" (AFIR) und die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED III) eine entscheidende Rolle. Um die Emissionen im Straßenverkehr zu reduzieren, sieht der VDA den EU-Emissionshandel für Gebäude und Verkehr (ETS-II) als entscheidendes Instrument.

Mit 25 Prozent macht der Verkehrssektor eine erhebliche Menge der CO₂-Emission in der EU aus, wobei davon mehr als zwei Drittel auf den Straßenverkehr entfallen. Rund 60 Prozent der Emissionen im Straßenverkehr werden durch Pkw verursacht, Nutz-fahrzeuge sind für 40 Prozent verantwortlich. Diese Zahlen verdeutlichen die Notwendigkeit, den Straßenverkehr zu defossilisieren.

Der VDA betrachtet die E-Mobilität als Technologie der Zukunft. Der in Deutschland (noch) knapp vorhandene Grünstrom ist in der Elektrifizierung deshalb am effizientesten eingesetzt. Doch werden in Deutschland und der EU noch viele Jahre Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor unterwegs sein. Dieser Fahrzeugbestand kann nur mit erneuerbaren Kraftstoffen defossilisiert werden. Diese können synthetisch aus erneuerbarer Elektrizität oder aus biogenen Quellen hergestellt werden.

Die Debatte um erneuerbare Kraftstoffe sollte sich nicht auf E-Fuels beschränken, sondern die Erfüllungsoptionen der RED III berücksichtigen. Dazu zählen auch Biokraftstoffe, die bereits heute verfügbar sind und fossilen Kraftstoffen in wachsendem Verhältnis beigemischt werden können. Die RED III legt für fortschrittliche Biokraftstoffe und RFNBO (Renewable Fuels of Non-Biological Origin) bewusst Unterquoten fest, um eine Skalierung zu ermöglichen. Damit eine Skalierung erfolgt, braucht es jedoch einen ambitionierten und langfristigen regulatorischen Rahmen über 2030 hinaus – wie er bereits für den Flug- und Schiffsverkehr verabschiedet wurde. Der VDA spricht sich im Zuge der Umsetzung der RED III in nationales Recht für eine THG-Reduktion von 30 Prozent aus dem Kraftstoffsektor bis 2030 aus.

Insgesamt bietet das Paket "Fit for 55" einen umfangreichen Rahmen für das Zwischenziel 2030 auf dem Weg zur Klimaneutralität. Die Ziele sind ambitioniert, doch die deutsche Automobilindustrie bekennt sich zu den Klimaschutzzielen der EU sowie des Abkommens von Paris und ist bereit, die gesetzten Ziele mit entsprechenden Investitionen und Innovationen zu erreichen.



Wasserstoff-Technologien für den Antrieb im schweren Fernverkehr

Florian Lindner, Stephan Schraml, Maximilian Weidner, Dominic Hyna, Daniel Teubner, Stefan Buhl, Andreas Broda

Kurzfassung

Angesichts der dringenden Notwendigkeit, die anthropogen verursachte Klimaerwärmung zu begrenzen, haben zahlreiche Staaten und Unternehmen verbindliche Zusagen zur massiven Reduktion des CO₂-Ausstoßes in den kommenden Jahren gemacht. Der Verkehrssektor, insbesondere der kommerzielle Straßengüterverkehr, spielt eine entscheidende Rolle bei dieser Reduktionsstrategie. Ein technologieoffener Ansatz, der verschiedene klimafreundliche Lösungen gleichzeitig zulässt, bietet das Potential für eine schnelle CO₂-Reduktion, da er eine zügige Markteinführung neuer Technologien ermöglicht.

MAN Truck & Bus SE erforscht in diesem Zusammenhang nicht nur batterieelektrische Antriebe (BEV), sondern auch Wasserstofftechnologien, einschließlich Wasserstoffverbrennungsmotoren (H₂-ICE) und Brennstoffzellen (FCEV). Der Fokus dieses Beitrags liegt auf einem von MAN entwickelten H₂-ICE Prototypfahrzeug sowie einem Brennstoffzellenkonzeptfahrzeug.

Wasserstoffverbrennungsmotoren bieten Tank-to-Wheel eine CO_2 -freie Alternative zu herkömmlichen Dieselmotoren und können in Kombination mit Brennstoffzellen dazu beitragen, die Emissionsziele schneller zu erreichen. Insbesondere aufgrund der EU-Gesetzgebung, die eine Reduktion des CO_2 -Ausstoßes von 30% auf 45% gegenüber dem Flottenwert von 2019 vorsieht, wird der Einsatz alternativer Antriebe immer dringlicher.

Wasserstoff bietet signifikante Vorteile gegenüber anderen Energiequellen, insbesondere im Hinblick auf die Verfügbarkeit und die Geschwindigkeit der Betankung. Die EU hat in ihrer Strategie für sauberen Wasserstoff, die Teil des Europäischen Grünen Deals ist, das Ziel festgelegt, bis 2024 bis zu 6 GW erneuerbare Wasserstoffelektrolysekapazitäten zu installieren und bis 2030 mindestens 40 GW zu erreichen. Diese Entwicklungen zeigen, dass Wasserstoff eine wichtige Rolle in Europas Energiestrategie und zur Erreichung der CO₂-Reduktionsziele spielen wird.

Der Wasserstoffverbrennungsmotor kann als Brückentechnologie dienen, um den Übergang zu umweltfreundlichen Antrieben zu beschleunigen, und bietet durch die Nutzung bestehender Fahrzeugkonzepte und Infrastrukturen eine schnelle Marktfähigkeit. Zugleich erkundet MAN auch Brennstoffzellen, die langfristig eine noch nachhaltigere Lösung bieten können, jedoch den Aufbau spezifischer Infrastrukturen erfordern.



1. H₂-Verbrennungsmotor als lokal CO₂-freier Antrieb

Die aktuellen Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen, die im Rahmen des Pariser Klimaabkommens angestrebt werden, liegen deutlich hinter dem vorgesehenen Zeitplan. Insbesondere im Verkehrs- und Gebäudesektor konnten die angestrebten Emissionsreduktionen bislang nicht erreicht werden.

In Reaktion darauf hat die Europäische Kommission strengere CO_2 -Ziele festgelegt, um eine beschleunigte Dekarbonisierung des Transportsektors zu fördern und somit die Einhaltung der EU-Klimaziele zu gewährleisten. Der jüngste Vorschlag umfasst eine Verschärfung der CO_2 -Reduktionsziele von 30 % auf 45 % im Vergleich zum Flottenwert von 2019.

Es ist klar, dass die notwendigen Einsparungen nicht länger allein durch Effizienzsteigerungen bei den derzeit dominierenden Antriebskonzepten, insbesondere Dieselmotoren, erreicht werden können. Aufgrund ihrer Effizienz und der geltenden Vorschriften setzen die wichtigsten Hersteller von Nutzfahrzeugen auf batterieelektrische Lösungen, die kurz- und mittelfristig durch wasserstoffbasierte Antriebe ergänzt werden. Andere Konzepte wie hydrierte Pflanzenöle (HVO) oder kohlenstoffbasierte synthetische Kraftstoffe bieten zwar ebenfalls Potenzial zur CO₂-Reduktion, werden jedoch aufgrund der geltenden Gesetzgebung, die die Emissionen auf Tank-to-Wheel-Basis bilanziert, nicht als nachhaltige Alternative berücksichtigt.

Mehrere Studien haben gezeigt, dass eine schnelle Dekarbonisierung des Verkehrssektors unter einem technologieexklusiven Ansatz hohe Risiken birgt. Besonders die begrenzte Verfügbarkeit von Rohstoffen und der zeitintensive Ausbau der notwendigen Infrastruktur stellen erhebliche Herausforderungen dar. Außerdem gibt es Anwendungen, die nur mit spezifischen Antriebskonzepten realisierbar sind. Ein technologieoffener Ansatz stellt daher die effizienteste Lösung dar, um mögliche Engpässe zu umgehen und zusätzliche Potenziale zur Emissionsreduzierung zu erschließen. Dadurch wird eine Erfüllung der ambitionierten Klimaziele der EU besser gewährleistet.



Abbildung 1 : Szenarien für CO₂-freie Mobilität laut FVV Fuel Study IV [1]

In diesem Kontext bietet der Wasserstoffverbrennungsmotor (H₂-ICE) als alternative Antriebstechnologie trotz seiner geringeren Effizienz im Vergleich zu batterieelektrischen oder brennstoffzellenbetriebenen Antrieben bedeutende Vorteile:



- · Verwendung anderer, weniger kritischer Rohstoffe im Vergleich zu BEV/FCEV
- Unabhängigkeit von einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur
- Hohe Fahrzeugverfügbarkeit durch effiziente Betankung
- Anwendbarkeit in anspruchsvollen Szenarien mit hohen Lasten
- Marktfähigkeit durch Anpassung bestehender Produktions- und Montagelinien
- Nutzung vorhandener Servicenetzwerke

Der H₂-Verbrennungsmotor kann als Brückentechnologie die Einführung CO₂-neutraler Antriebe beschleunigen und stellt in spezifischen Anwendungsnischen eine effektive Ergänzung zu batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Antrieben dar.

2. Design des H4576LF Prototypmotors

Der H4576LF Prototypmotor hat seinen Ursprung in dem bewährten Dieselmotor D38, der 2015 in Serie eingeführt wurde und mit einer Leistung von mindestens 500 PS und einem Drehmoment von 2300 Nm den Anforderungen im Fernverkehr entspricht.

	D3876 (Diesel)	H4576 (hydrogen prototype)
Cylinders	6 / inline	6 / inline
Bore/stroke	138 mm / 170 mm	145 mm / 170 mm
Displacement	15.2 L	16.8 L
Compression ratio	1:19	1:11-13
Cylinder peak pressure	250 bar	170 bar
Engine Power	P= 412 kW / 560 hp; Md= 2700 Nm	
	P= 383 kW / 520 hp; Md= 2500 Nm	P _{max} = 382 kW / 520 hp Md _{max} = 2600 Nm
	P= 471 kW / 640 hp; Md= 3000 Nm	_
Fuel Injection	common rail / central injection	low pressure direct injection (DI)/ eccentric injection
Maximum fuel pressure	2500 bar	22 bar
Ignition	compression ignition	central cold spark plug
Turbocharging	two-stage	single-stage
Charge air cooling	indirect low temp. cycle	direct air-to-air
Cam shaft	SOHC	SOHC
Exhaust aftertreatment	DOC+DPF+SCR	SCR
EGR	yes	no
Height	720 mm	774 mm
Length	1688 mm	1688 mm
Width	960 mm	950 mm

 Tabelle 1: Vergleich der Kenngrößen des Dieselaggregats D3876

 und des H2-Versuchsaggregats H4576

14

Aufgrund der geringeren Leistungsdichte von Wasserstoff im Vergleich zu Diesel ist für den H4576LF ein größerer Hubraum notwendig, um äquivalente Leistung und Drehmomente zu erzielen. Die D38-Motorenplattform bot sich daher als idealer Ausgangspunkt für die Entwicklung des H₂-Prototypmotors an.

Der Umbau des D38 zum H4576LF umfasste signifikante Modifikationen im Verbrennungsprozess sowie an den Komponenten für Luft- und Kraftstoffzufuhr, um den Anforderungen eines Wasserstoffbetriebs gerecht zu werden. Die Übernahme zahlreicher Basiskomponenten wie das Kurbelgehäuse, die Kurbelwelle und die Pleuelstangen sowie Teile des Kühl- und Ölkreislaufs ermöglichte eine effiziente Nutzung vorhandener Fertigungsressourcen.



Abbildung 2: Gleichteile und Änderungsumfang (dunkel hervorgehoben) des H₂-Versuchsaggregates zum D38-Dieselmotor

Der modifizierte Motor verfügt über eine neue Motorsteuerungseinheit (ECU), die speziell auf die Anforderungen des Wasserstoffbetriebs abgestimmt ist. Der H4576LF wird als Magergasmotor betrieben, was zu deutlich niedrigeren Abgastemperaturen im Vergleich zu Dieselmotoren führt. Um die Herausforderungen durch Fehlzündungen, die zu schweren Motorschäden führen können, zu bewältigen, ist der Motor mit einem innovativen System für direkte Wasserstoffeinspritzung ausgestattet. Dieses System ermöglicht verbesserte Lastwechselreaktionen und multiple Einspritzvorgänge pro Zyklus, was die Homogenisierung des Kraftstoff-Luft-Gemisches und eine effiziente Verbrennung unterstützt.

Anpassungen an Zylinderkopf und Ventiltrieb waren erforderlich, um zusätzlichen Raum für das Zünd- und Einspritzsystem zu schaffen. Trotz dieser Modifikationen bleibt das SOHC-Design (Single Overhead Camshaft) erhalten, was eine maximale Teilekompatibilität mit dem ursprünglichen Dieselmotor sicherstellt. Dies minimiert die Komplexität und Kosten des Übergangs zu Wasserstoffantrieben.

Zur Unterstützung der Leistung des Motors wurde ein neuer, hocheffizienter, einstufiger Wastegate-Turbolader eingeführt. Die Anpassungen an Luft- und Abgasführungskomponenten ermöglichen eine Vereinfachung im Vergleich zum zweistufig aufgeladenen Dieselmodell, wodurch Gewicht und Komplexität reduziert werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. In der Entwicklung des H4576LF hat MAN auch auf innovative Wasserstoffspeichertechnologien gesetzt. Ein 700-bar-Druckgasspeicher ermöglicht eine hohe Speicherdichte und maximale Reichweite des Fahrzeugs. Das nachfolgende Diagramm zeigt die Dichte von Wasserstoff abhängig von Druck und Temperatur. Die Nutzung sowohl von verflüssigtem (LH₂) als auch kryokomprimiertem Wasserstoff (CGH₂) wird evaluiert, wobei jedes System spezifische technische Vor- und Nachteile aufweist. Zurzeit scheitert es jedoch an der Verfügbarkeit der kryogenen Medien. Bei zukünftiger breiter Verfügbarkeit wären beide Wasserstoffantriebssysteme (ICE & FC) zur Nutzung in der Lage. Der Ausbau der aktuellen Tankinfrastruktur weist jedoch in die Richtung der Nutzung von 700 bar Druckgas, so dass die aktuellen H₂-Fahrzeuge der MAN damit ausgestattet sind.



Abbildung 3: H₂- Speicherstrategien [ILK Dresden]

Die Gastanks befinden sich hinter der Fahrzeugkabine. Das Gasversorgungssystem enthält einen Hochdruckkreis (700 bar) und einen Niederdruckkreis (30 bar). Nachdem der Wasserstoff auf das geringere Druckniveau entspannt ist, wird das Gas zum Motor geleitet. Am Motor selbst wird der Druck mit zwei parallelen, variablen Druckreglern eingeregelt. Der Wasserstoff wird an zwei Stellen in den Zylinderkopf eingeleitet, über ein Rail im gesamten Zylinderkopf verteilt und über eine Seiteneinspeisung den Injektoren zugeführt. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass der Bereich des Ventiltriebs frei von H₂-Versorgungsteilen ist.

3. Abgasnachbehandlung für H₂-Verbrennungsmotoren

Ein magerbetriebener Wasserstoffverbrennungsmotor (H₂-ICE) emittiert signifikant niedrigere Schadstoffmengen als ein vergleichbarer Dieselmotor. Insbesondere sind die Emissionen von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid minimal, da diese

hauptsächlich aus dem Motoröl stammen und nicht aus dem Kraftstoff selbst. Stickoxide (NO_x) sind die vorrangigen Emissionen, die in beachtlichen, aber im Vergleich zu Diesel deutlich reduzierten Mengen auftreten. Partikelemissionen sind in der Regel gering und treten hauptsächlich bei abnormen Verbrennungsereignissen auf.

Die Frage der Notwendigkeit einer Abgasnachbehandlung bei H₂-ICE stellt sich angesichts dieser niedrigen Emissionswerte. Untersuchungen bei MAN haben gezeigt, dass das Emissionsniveau nach Euro VIe auch ohne Abgasnachbehandlung erreichbar ist. Allerdings kann eine moderate Erhöhung des NO_x-Rohemissionsniveaus Vorteile bringen, insbesondere in Bezug auf die Fahrbarkeit. Diese Verbesserung des Ansprechverhaltens ist darauf zurückzuführen, dass bei schneller Lastaufschaltung kurzzeitig nicht genügend Luftüberschuss im Brennraum zur Verfügung steht, was zu kurzfristigen, aber signifikanten Emissionspeaks führt. Auch unter stationären Bedingungen mit niedriger Drehzahl und hoher Last kann durch den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen die Einhaltung der Emissionsstandards auch ohne komplexes Aufladesystem gewährleistet werden.

In Anbetracht strengerer zukünftiger Abgasnormen, wie etwa der geplanten Euro VII, wird der Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen unumgänglich, um sowohl die Einhaltung der Emissionsvorschriften als auch ein zufriedenstellendes Fahrverhalten sicherzustellen. Der Einsatz eines Partikelfilters kann insbesondere unter kritischen Betriebsbedingungen die Emissionssicherheit deutlich erhöhen.

Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz eines ergänzenden Abgasnachbehandlungssystems die bereits niedrigen Rohemissionen weiter signifikant bis an die Nachweisgrenze zu reduzieren. Dies trägt zur Vision eines "Zero-Emission-Vehicle" bei, indem es die Umweltbelastung weiter minimiert und die Luftqualität verbessert.

4. Eingesetztes AGN-System

Im Rahmen des ersten Entwicklungsansatzes bei MAN wurde das aktuelle EuroVle-Abgasnachbehandlungssystem (AGN) der Serienproduktion beibehalten, um einen hohen Anteil an Gleichteilen für einen möglichen späteren Serieneinsatz sicherzustellen. Aufgrund des geringen Potentials für CO- und HC-Emissionen wurde der Dieseloxidationskatalysator (DOC) entfernt. Ebenso wurde auf den Dieselpartikelfilter (DPF) verzichtet, da bei einem kohlenstofffreien Kraftstoff keine messbare Rußbildung auftritt. Das SCR-System (selektive katalytische Reduktion) und der Ammoniak-Schlupfkatalysator (ASC) wurden direkt aus der Seriendieselkonfiguration übernommen, obwohl ihr Volumen ursprünglich für höhere Rohemissionen ausgelegt ist.

Das System zeigte eine ausgezeichnete Leistung in Bezug auf die NO_x-Reduktion. Allerdings wurde bei den ersten Partikelanzahlmessungen (PN) festgestellt, dass die Emissionen teilweise vergleichbar mit denen eines Dieselmotors waren. Diese Beobachtung lässt sich auf zwei Hauptursachen zurückführen:

Abnormale Verbrennungsereignisse: Diese treten sporadisch auf und führen zu kurzen, aber intensiven Spitzenwerten in der Partikelanzahl, die das normalerweise niedrige PN-Rohemissionsniveau des Motors weit übersteigen. Es wird vermutet, dass diese Partikel ähnlich wie bei klopfenden Gasmotoren durch das Abplatzen des Ölfilms

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. von der Brennraumwand entstehen. Verschiedene Ursachen für diese Ereignisse wurden bereits im Verlauf der Motorentwicklung identifiziert, und durch Optimierungen im Brennraumdesign und in der Applikation konnten diese erheblich reduziert werden. Eine vollständige Eliminierung bleibt jedoch unter extremen Bedingungen eine Herausforderung.

AdBlue-Dosierung: Die Dosierung von AdBlue ist eine dominante Quelle für Partikelemissionen. Bereits die Aktivierung der Dosierung erzeugt PN₁₀-Werte, die den von der EU-Kommission für die Emissionsstufe EuroVII vorgeschlagenen Grenzwerten entsprechen. Ein direkter Zusammenhang zwischen Dosiermenge und Partikelanzahl ist feststellbar, und trotz der geringeren AdBlue-Mengen im Vergleich zur Dieselabgasnachbehandlung werden ähnlich hohe Partikelzahlen produziert. Dies liegt möglicherweise an der Kombination aus kleinen Dosiermengen, abweichenden Abgastemperaturen und einer veränderten Abgaszusammensetzung.

Durch die Integration des ursprünglich entfernten DPFs könnten die motorseitigen Partikelemissionen nahezu vollständig eliminiert werden. Die Reduzierung der AdBluebasierten Partikelemissionen bleibt jedoch eine Herausforderung, da die Geometrie des AGN-Systems im Sinne der Gleichteilestrategie unverändert bleiben soll. Daher ist eine filternde Komponente stromabwärts der Dosierstelle erforderlich. Als effiziente und platzsparende Lösung wurde der SCR-Katalysator durch einen SDPF (SCR-DPF) ersetzt. So bleiben alle Hauptkomponenten und Prozesse erhalten, lediglich eine katalytische Komponente im System wird ersetzt. Diese Änderung führt zu einem leicht erhöhten Gegendruck, was zu einem geringen Mehrverbrauch führen kann

5. Emissionen am Motorprüfstand

Sowohl im WHSC als auch im WHTC kann durch den Einsatz eines SDPF (SCRbeschichteter Dieselpartikelfilter) die erhoffte Reduktion der Partikelanzahl um bis zu 95% erzielt werden. Diese Effizienz des SDPF ist auch unter extremen Betriebsbedingungen, wie sie durch eine Motoreinstellung zur Simulation häufiger Klopfereignisse erzeugt werden, erhalten geblieben. Durch solche Anpassungen lässt sich das dynamische Verhalten des Motors unter variierenden Belastungen und während typischer Betriebszyklen untersuchen, wobei die Emissionen stets deutlich unter den strengsten Emissionsnormen gehalten werden können.



Abbildung 4: Layout AGN-Konzept ohne DOC/DPF und mit SCRF in Serienschalldämpfer



Abbildung 5: Reduzierung von PN10 durch SDPF in ausgewählten Zyklen



Abbildung 6: Gasförmige Emissionen im kalt/heiß WHTC

6. Emissionen im realen Fahrbetrieb

Die Evaluierung des SCR-Systems ohne Integration eines Diesel-Partikelfilters (DPF) wurde mittels PEMS (Portable Emission Measurement Systems) im Einklang mit den EuroVIe-Standards durchgeführt. Die bisherigen Messungen liefern jedoch keine Daten für zukünftig relevante Emissionskomponenten wie Ammoniak (NH₃), Lachgas (N₂O) und ultrafeine Partikel (PN₁₀). Ergänzende Untersuchungen auf dem Motorprüfstand zeigen, dass eine Reduktion der Partikelzählgrenze von 23 nm auf 10 nm zu einer Verdopplung, bis Verdreifachung der PN-Werte führt.

Obwohl zwischen den Konzepten mit SCR und SDPF auf dem Prüfstand keine Performancenachteile festgestellt wurden, zeigen diese Messungen, dass das SDPF-System repräsentativ für den geplanten realen Einsatz ist. Es wird erwartet, dass die Partikelanzahl (PN) im realen Straßenbetrieb ähnlich stark reduziert wird.

Die Emissionsergebnisse, die während einer konformen EuroVIe-Messfahrt gesammelt wurden, sind in Tabelle 2 dargestellt und werden den Vorschlägen der Europäischen Kommission für die zukünftige EuroVII-Norm gegenübergestellt. Diese Daten verdeutlichen das Potenzial des H $_2$ -ICE (Wasserstoff-Verbrennungsmotor) zur Erfüllung strengerer Emissionsstandards.

[mg/ kWh]	Cold	Hot	combined	EU VII RDE-limit
NO _x	13,42	17,04	16,53	260
PN ₂₃	1,54x10 ¹¹	1,86x10 ¹¹	1,81x10 ¹¹	9x10 ¹¹
СО	0	0	0	1950
THC	3,23	2,16	2,31	755

Tabelle 2: PEMS-Messung ausgewertet nach EUVIe und EUVII. * Hier noch PN₂₃ statt PN₁₀

7. H₂-FC Truck "Bayernflotte"

Im Rahmen der Vorentwicklungsprojekte untersucht MAN neben den Wasserstoffverbrennungsmotoren auch den Einsatz von Brennstoffzellen in verschiedenen Fahrzeuganwendungen. Diese Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zielen darauf ab, maximale Synergien mit batterieelektrischen Sattelzugmaschinen zu erreichen, insbesondere durch die Ausrichtung auf den schweren Fernverkehr. Die Brennstoffzellen-Systeme (BZ-Systeme) weisen eine hohe Leistung von 240 kW auf und bieten im Batterieverbund eine für den Fernverkehr typische Antriebsleistung von über 300 kW. Das H₂-Speichersystem ist darauf ausgelegt, typische Fernverkehrsreichweiten von über 500 km abzudecken und maximiert die Synergien zum Tanksystem der H₂-ICE-Fahrzeuge.

Ein Hauptaugenmerk liegt auf der Entwicklung einer innovativen Betriebsstrategie, die eine optimale Kombination von Batterie- und Brennstoffzellenkapazitäten ermöglicht. Weiterhin wird an einem modularen und zukunftsfähigen Kühlkonzept gearbeitet, das eine hohe funktionale Integration verschiedener Komponenten und Subsysteme ermöglicht. Das Thermomanagement von Brennstoffzellen-betriebenen Fahrzeugen stellt eine der größten Herausforderungen für die Kundenakzeptanz und die Serienreife dar. Brennstoffzellen haben zwar grundsätzlich einen hohen Wirkungsgrad, die Verlustleistung wird jedoch größtenteils über die Fahrzeugkühlung bei niedrigen Temperaturen (80 bis 90°C) abgeführt. Dies stellt höhere Anforderungen an die Kühlleistung des Fahrzeugs im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor, dessen Kühlmitteltemperaturen bis zu 120°C erreichen können.

Die Begrenzung durch europäische Regelungen zu Fahrzeugdimensionen schränkt die mögliche Erweiterung der Kühlflächen ebenfalls ein. Auch eine Erhöhung der Lüfterleistung ist nur bedingt möglich, da dies zu parasitären Verlusten führt, die die Effizienz des Gesamtfahrzeugs signifikant reduzieren können. Als Lösung wurde ein spezifischer "Kühlturm" entwickelt, in dem die Hoch- und Niedertemperaturkühlkreisläufe integriert sind. Für zukünftige Serienanwendungen ist es denkbar, abhängig von der Performance der Brennstoffzellen, Fahrzeuge ohne Kühlturm zu realisieren, die trotz geringfügiger Leistungseinbußen Kosten- und Packagevorteile bieten.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Abbildung 7: System-/Kühlerintegration eines FC-Konzeptfahrzeugs

Da die Fahrzeuge der "Bayernflotte" noch in der Inbetriebnahmephase sind, sind derzeit keine direkten Verbrauchsmessfahrten zwischen H₂-ICE und Brennstoffzellen sowie rein batterieelektrischen Antrieben verfügbar. Allerdings wurden Simulationsmodelle entwickelt, die eine vergleichende Bewertung auf einer standardisierten MAN-Verbrauchsmessfahrt ermöglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass das batterieelektrische Fahrzeug am effizientesten ist, da es nur geringe Umwandlungsverluste der gespeicherten Energie hat und zudem die Möglichkeit bietet, Bremsenergie zu rekuperieren. Das Brennstoffzellenfahrzeug folgt mit einem Verbrauchsvorteil von 19% und bietet ebenfalls Rekuperationsfähigkeit sowie einen deutlich besseren Wirkungsgrad des Energiewandlers im Vergleich zu Verbrennungsmotoren. Die mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeuge, trotz ihres thermodynamisch benachteiligten Otto-Brennverfahrens, erzielen ebenfalls bemerkenswerte Ergebnisse und tragen bei Nutzung von 100% erneuerbarer Energie signifikant zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs bei.

	H2 consumption	Diesel (equivalent)	Energy consumption	Comp. to Diesel	CO2 (TtW)
	[kg/100km]	[l/100km]	[kWh/100km]	[%]	[kg/100km]
Fossile Diesel Truck		29,2	286,16		77,38
H2-ICE Truck	9	30,3	297	4%	0
H2-FC Truck	7	23,6	231	-19%	0
eTruck		12,6	122	-57%	0



Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Wasserstoffverbrennungsmotoren (H₂-ICE) und Brennstoffzellen (FCEV) als komplementäre Antriebstechnologien zu batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) im Nutzfahrzeugsektor betrachtet. Der H₂-Verbrennungsmotor, basierend auf dem D38-Dieselmotor, wurde angepasst, um effizient mit Wasserstoff zu arbeiten. Er bietet eine schnelle Marktreife, hohe Verfügbarkeit und Flexibilität für anspruchsvolle Anwendungen.

Im Vergleich dazu liefert die Brennstoffzellentechnologie eine emissionsfreie Lösung mit höherem Wirkungsgrad, da sie Wasserstoff direkt in Strom umwandelt. Ergänzt um die Rekuperationsfähigkeit eines entsprechenden batterieelektrischen Fahrzeugs wird damit eine deutlich größere Reichweite möglich. Allerdings erfordert sie eine komplexe Fahrzeuginfrastruktur und ist derzeit in der Herstellung noch teurer.

Durch ihre unterschiedlichen Stärken ergänzen sich H_2 -Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen optimal zu batterieelektrischen Fahrzeugen. Die Kombination ermöglicht eine flexible, effiziente Strategie, um den Verkehrssektor nachhaltig zu dekarbonisieren und CO₂-neutrale Mobilität zu fördern.

Quellen

[1] Dr.-Ing. Ulrich Kramer, Dr. David Bothe, Dr. Christoph Gatzen, André Pfannenschmidt, Carolin Baum, Fabian Schrogl, Osama Mahmood: "Future Fuels: FVV Fuels Study | Final report", Project no. 1452

Dr.-Ing. Andreas Broda, Maximilian Weidner, Dominic Hyna, Florian Lindner, Thomas Malischewski, Daniel Teubner, Jürgen Schmitt, Dr.-Ing. Stephan Schraml, "H₂-Verbrennungsmotor mit Direkteinblasung für den Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen mit Abgasnachbehandlung für zukünftige Niedrigstemissionsanforderungen", 19. FAD-Konferenz, Dresden, 2022

F. Lindner, M Weidner, D. Hyna, T. Malischewski, Dr. A. Broda, D. Teubner, J. Schmitt, Dr. S. Schraml, "4X2 Tractor with a hydrogen combustion engine – highest performance with lowest emissions" 10. Internationaler Motorenkongress, Baden-Baden, 2023

Dr. S. Schraml, F. Lindner, D. Hyna, M. Weidner, R. Zakrzewski, Dr. A. Broda, "Wasserstoff-Verbrennungsmotor – ein klimaneutraler Antrieb für schwere Nutzfahrzeuge", Dresdner Wasserstoffsymposium, Dresden, 2023



Hanno Krämer

Abstract

During the 5th FJRG 2022 conference, Audi presented engine emission measurements with a potential high-octane, highquality drop-in reFuel within the limits of EN 228 E5 (called Audi MTO) in comparison to a very clean burning first-fill-fuel (ASF) and two standard fossil fuels. Finally, Audi MTO showed, similar to ASF, a very clean burning behavior compared to the well-known fossil fuel types on a dynamic engine test bench regarding gaseous and particulate emissions during WLTC cycles [1]. But Audi MTO rather stands for the upper limit of what is possible at the end of a deep and long fuel-development than being the first step to reduce CO₂ emissions in an easy way. The easiest way to increase the renewable content in gasoline in order to save CO₂ seems to be to increase the ethanol content from today's max. 10% to 20 or 25% as is done e.g. in India or Brasil. This consequently raises the question, how an E20 or E25 performs concerning engine emissions compared for example to Audi MTO or the abovementioned fossil standard fuels in WLTC. The according results, taken again on a dynamic engine test bench are presented in this paper.

1. Einleitung

Während FJRG_5 hatte Audi Emissionsergebnisse von zwei sehr sauber verbrennenden Kraftstoffalternativen (ASF und Audi MTO) mit denen von Standard ROZ95_E10 und einem PN-kritischen Grenzkraftstoff (EU5_cert) präsentiert [1]. Während der ASF-Kraftstoff lediglich in der Dichte leicht unterhalb der EN228 liegt, entspricht Audi MTO vollumfänglich der Norm und weist darüber hinaus eine extrem hohe Oktanzahl aus. Beide Kraftstoffe zeichnen sich weiterhin durch Ethanolfreiheit aus, was sie besonders auch für den Oldtimermarkt prädestiniert. Für Audi MTO ist obendrein eine Herstellroute ausgewiesen, die einen erneuerbaren Anteil von 80% erlaubt [2] und damit entsprechende CO₂-Einsparungen in der Kraftstoffherstellung ermöglicht.

Die beiden Kraftstoffe profitieren hinsichtlich ihrer PN-Emissionen klar davon, dass sie keine Aromaten enthalten, wodurch sie sich als Referenzen für niedrigstes PN-Emissionsniveau in den Messungen erwiesen. Gleichzeitig befinden sie sich genau dadurch vergleichsweise weit weg von typischer Tankstellenware, die regelmäßig Aromatengehalte zwischen 20 und 35% aufweist. Insofern stellt sich die Frage, ob für die aktuelle (nicht von Oldtimern dominierte) Bestandsflotte CO₂-Einsparungen durch einen erhöhten erneuerbaren Anteil z.B. per Zumischung von 20 bis 25% Ethanol zu klassischer Tankstellenware ein logischer und besonders einfach darstellbarer erster Schritt wäre. Entsprechende Aktivitäten zur Definition einer solchen Ware wurden bereits bei DIN und CEN gestartet und eröffnen sofort die Fragestellung, wie sich die

Emissionen solcher Kraftstoffe im Vergleich zu herkömmlicher Ware und zu einer unteren Referenz im Grundsatz verhalten.

2. Testmethode und Versuchsbedingungen

Zum Einsatz kam erneut ein 4-Zylinder-Motor der Baureihe EA888 von Audi, der auf einem dynamischen Prüfstand im WLTC bei zwei verschiedenen Starttemperaturen betrieben wurde. Die Eckdaten des Aggregates sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Motor:	2.0I TFSI EA888 evo4 MLB LK2 EU6AP
Тур:	4 Zylinder, Reihe
Bohrung x Hub:	82,50 mm x 92,80 mm
Hubvolumen:	1984 ccm
Einspritzsystem:	Direkteinspritzung, seitliche Injektorlage
Einspritzdruck:	350 bar
Max. Leistung / 1/min:	195 kW / 5000 – 6500
Max. Moment / 1/min:	380 Nm / 1600 – 4300
Getriebe:	DL382 7-Gang S-Tronic
Schwungmassenklasse:	2268 kg

Tabelle 1: Motordaten

Vermessen wurden sowohl die Tailpipe-Emissionen als auch die Roh-Emissionen der Partikelanzahl. Als Vergleichskraftstoffe dienten der gesetzliche Zertifizierungskraftstoff für EU5, welcher sich in der Vergangenheit als zwar insgesamt hochwertiger, aber stark partikelbildender Kraftstoff erwiesen hat, tankstellenähnliche Ware der Qualität 95 E10 und als beste Referenz in diesem Fall der Audi MTO Kraftstoff als Idealbild eines weitgehend erneuerbar herstellbaren, sehr sauber verbrennenden und hochwertigen Kraftstoffes.

Der Kraftstoff mit 20% Ethanol leitet sich ab aus unserem für schlechtes PN-Emissionsverhalten bekannten Grenzkraftstoff EU5cert, welcher hier als Basis dient, und lediglich mit weiteren 15% Ethanol angereichert wird. Da der EU5cert grundsätzlich bereits 5% Ethanol enthält, ergibt sich in Summe ein E20 Grenzkraftstoff für besonders schlecht zu erwartende PN-Emissionen (E20_worst). Entsprechend des o.g. Vorgehens stellen sich auch die Stoffdaten des E20_worst als eine Verdünnung des EU5cert mit Ethanol dar. Es sinken T90, Siedeende, Aromatengehalt und YSI durch die Verdünnung des EU5cert, wie in der Tabelle 2 gut zu sehen ist.

Der Kraftstoff mit 25% Ethanol leitet sich ab aus einer nicht näher eingeschränkten EN228-Qualität, welche ebenfalls schlichtweg so lange mit Ethanol angereichert wird, bis im Endprodukt der gewünschte Ethanolgehalt vorliegt. Der E25 ist dabei leider keine direkte Ableitung aus dem hier vorliegenden ROZ95_E10, da Kraftstoffe unterschiedlicher Lieferanten (mit entsprechend unterschiedlichen Basiskraftstoffen) verwendet wurden. Dies erkennt man in der Stoffdatentabelle recht gut beim Vergleich z.B. von Siedeende und Aromatengehalt, die beide jeweils nicht so stark durch den

Ethanolgehalt beeinflusst werden, wie sie sich in ihren Werten in der Tabelle 2 unterscheiden. Insbesondere das höhere Siedeende des E25 zeigt, dass hier ein völlig anderer Basiskraftstoff verwendet wurde als beim ROZ95_E10.

		MTO	RON95	E25	E20_	EU5
		Audi	E10	Audi	worst	cert
RON	-	107	96	101	104	101
DVPE	kPa	68	58	56	57	60
Density	kg/m3	722	749	755	761	754
EVAP@150	%	78	94	89	86	84
Т90	°C	174	143	153	173	178
FBP	°C	184	170	195	201	204
Aromatics	%v	0	31	21	27	32
Aromatics >C8	%v	0	7	9	13	16
YSI_calc	-	62	97	85	103	116
Oxygen	%m	2,7	3,5	9,4	7,4	1,8
Ether	%v	15	0	0	0	0
Ethanol	%v	0	9	26	20	5
LHV (mass.)	MJ/kg	43,2	41,9	40,1	39,4	42,0
LHV (vol.)	MJ/L	31,2	31,4	30,3	30,0	31,7

Tabelle 2: Eigenschaften der Kraftstoffe

Weitere wichtige Eckdaten der verwendeten Kraftstoffe sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Hierbei bedeuten die grün hinterlegten Felder günstige Kraftstoffeigenschaften hinsichtlich möglichst niedriger PN-Emissionen, während die gelben Felder als bereits kritisch zu betrachten sind. Rötlich eingefärbte Felder signalisieren Eigenschaften, die als ernsthaft problematisch eingestuft werden. Aus den vorherigen Messungen ist bereits bekannt, dass die beiden gelben Eintragungen beim Audi MTO Kraftstoff die PN-Ergebnisse dieses Kraftstoffes zwar beeinflussen, aber nicht dominieren, da er mit seinem vergleichsweise niedrigen Siedeende von 184 °C diesen Nachteil weitgehend wieder kompensiert und er v.a. von seinem sehr niedrigen YSI stark profitiert.

3. Ergebnisse

Bild 1 zeigt die gasförmigen Emissionen NO_x, CO und HC der genannten Kraftstoffe im Vergleich zu den gesetzlichen Grenzen von EU6 AP. Die Messung entspricht nicht exakt einer Homologationsmessung, da hier ein dynamischer Motorprüfstand anstelle eines konditionierten Fahrzeuges auf der Rolle eingesetzt wurde. Dennoch erhält man einen guten Überblick, wie sich die unterschiedlichen Kraftstoffe auf das Emissionsverhalten auswirken. Bei den gasförmigen Emissionen sind zwar z.B. beim NO_x durchaus Unterschiede zu sehen, insgesamt ist aber kein systematischer oder großer Einfluss der Kraftstoffe zu erkennen. Alle Emissionen befinden sich weit unterhalb der

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. gesetzlichen Limits, was angesichts eines neuen, nicht gealterten Katalysators jedoch auch erwartet werden muss.

Bild 2 zeigt die Roh-Emissionen des Motors hinsichtlich PN. Die Kraftstoffe sind in aufsteigender PN-Folge abgebildet, wobei sofort auffällt, dass der ROZ95_E10 und der E25 das gleiche PN-Ergebnis aufweisen und in ihrer Reihenfolge somit austauschbar sind. Dies ist besonders interessant, da die beiden Kraftstoffe vom YSI her deutlich unterschiedliche PN-Emissionsniveaus aufweisen müssten, was durch die Messung jedoch nicht bestätigt wird. Es tritt hier ganz offensichtlich zu Tage, dass die PN-Bildung im Motor nicht allein durch die chemische Struktur der Kraftstoffkomponenten beeinflusst wird (->YSI), sondern auch durch die Lebensdauer der Kraftstofftröpfchen im Brennraum (->Siedeende) und durch die Einspritzdauer, welche sich bei niedrige-rem volumetrischem Heizwert verlängert und damit die Zeit für Verdampfung und Gemischhomogenisierung verkürzt (->LHVvol).



Bild 1: Vergleich der gasförmigen Emissionen der Kraftstoffe

Im konkreten Fall führt das um 25 °C (!!) niedrigere Siedeende des ROZ95_E10 (verbunden mit seiner um ca. 5% kürzeren Einspritzdauer) dazu, dass er auf dem gleichen PN-Niveau herauskommt wie der E25 mit seinem um 12 Punkte günstigeren YSI. Mit

26

Blick auf die Kraftstoffnormung bedeutet dies, dass neben dem YSI (bzw. indirekt dem Gehalt an schweren Aromaten) das Siedeende als ganz einfache und in der Norm bereits etablierte Messgröße eine maßgebliche Stellschraube zur Verbesserung der Kraftstoffqualität darstellt.



Bild 2: Vergleich der PN-Roh-Emissionen der Kraftstoffe

Was den E20_worst angeht, ist er in den gasförmigen Emissionen in Bild 1 völlig unauffällig im Vergleich zu allen anderen Kraftstoffen. Dagegen zeigt er bei den PN-Emissionen seine Herkunft aus dem EU5cert in Bild 2 sehr deutlich. Das hohe Siedeende und der hohe Gehalt an schweren Aromaten des EU5cert werden durch die Verdünnung mit dem sehr sauber verbrennenden Ethanol abgemildert, während die längere Einspritzdauer (durch den geringeren volumetrischen Heizwert) sicherlich nicht förderlich ist, aber das PN-Ergebnis auch nicht dominieren kann. Insofern verbleibt der E20_worst unterhalb seines Basiskraftstoffes bei den PN-Emissionen und liefert hier emissionsseitig keinerlei Argument gegen seine Verwendung, was ebenfalls eine wichtige Erkenntnis für die Normungsaktivitäten von E20 als neue Kraftstoffsorte darstellt.

Eine weitere wichtige Erkenntnis zeigt sich in Bild 3, welches die simultan mitgemessenen PN-Emissionen nach dem Partikelfilter im Verdünnungsbeutel zeigt, und somit ein Äquivalent zu den Tailpipe-Emissionen darstellt. Neben der Tatsache, dass der Audi MTO Kraftstoff nach dem Filter zwar immer noch auf sehr niedrigem Niveau, aber sichtbar schlechter abschneidet als vor dem Filter, zeigt sich für alle anderen Kraftstoffe weitgehend das gleiche Bild wie vor dem OPF. Die großen oben beschriebenen Unterschiede zwischen den restlichen Kraftstoffen bleiben auch nach dem OPF nahezu 1:1 erhalten. Das gilt sowohl für alle Beobachtungen zwischen dem ROZ95_10 und dem E25, als auch für den E20_worst und den EU5cert.

Dies zeigt, wie wichtig im Sinne der Umwelt es ist, nicht nur an der Fahrzeugtechnik, sondern unbedingt auch bei den Kraftstoffen Verbesserungen vorzunehmen, da diese

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. auch bei Einsatz modernster Filtertechnik weiterhin wirksam sind. Es ist offensichtlich, dass Kraftstoffzusammensetzungen wie die des EU5cert mit hohem Siedeende, hohem Gehalt an schweren Aromaten und folglich einem hohen YSI möglichst bald aus dem Marktgeschehen genommen werden sollten. Ebenso sollte eine solche Kraftstoffzusammensetzung zukünftig nicht als Basis für z.B. ein E20 eingesetzt werden, da sie ihre ungünstigen Eigenschaften an das Folgeprodukt weitgehend weitervererbt. Dies gilt gleichermaßen für ältere als auch für aktuelle Fahrzeuge.



Bild 3: Vergleich der PN-Tailpipe Emissionen der Kraftstoffe

4. Zusammenfassung

Im Gesamtvergleich der Kraftstoffe bestätigt sich der Audi MTO (wie anhand der Vorgängermessungen bereits erwartet) als ein ausgesprochen sauber verbrennender Kraftstoff, während auf der anderen Seite der EU5cert teilweise mehr als 5fach höhere PN-Emissionen erzeugt. Auch zwischen dem ROZ95_E10 und dem EU5cert ist sehr gut zu erkennen, welch erhebliche Auswirkung eine ungünstige Kraftstoffzusammensetzung selbst innerhalb der EN228 hinsichtlich der PN-Emissionen hat. Das gleiche gilt für den Vergleich der beiden Kraftstoffe mit erhöhtem erneuerbarem Anteil E25 und E20_worst, zwischen denen ein Faktor von ca. 1,7 liegt. Neben der Normung für E20 sollte diese Erkenntnis auch in die EN228, also die Normung aller Standard-Ottokraftstoffe, einfließen und mindestens zu einer Absenkung des Siedeendes, sowie möglichst auch zu einer Begrenzung der schweren Aromaten führen. Ergänzend wäre auch die Einführung des YSI mit einem noch festzulegenden Grenzwert in die Norm denkbar.

28



Literatur

- [1] Krämer, H., Send, M.: Alternative Kraftstoffe im Premium Automobilbereich. In: Krahl, J., Munack, A., Eilts, P., Bünger, J. (eds.) Fuels Joint Research Group, Kraftstoffe für die Mobilität von morgen, Band 33, pp.36-40. Cuvillier Verlag (2022).
- [2] Krämer, H., Borovsky, J., Bulc, A.: Hochoktaniger paraffinischer Ottokraftstoff innerhalb EN228 E5. In: Krahl, J., Munack, A., Eilts, P., Bünger, J. (eds.) Fuels Joint Research Group, Kraftstoffe für die Mobilität von morgen, Band 30, pp.63-70. Cuvillier Verlag (2021).



Alternative Fuels for Future Maritime Shipping

Johann Wloka, Christian Kunkel, Alexander Knafl

Kurzfassung

Im Jahr 2018 kündigte die Internationale Seeschifffahrtsorganisation (IMO) ihre Treibhausgas-Reduktionsstrategie an. Als Ziel wurde die Reduktion der Treibhausgasemissionen bis ins Jahr 2050 für die maritime Schifffahrt in Relation zum Jahr 2008 um 50% genannt. Bereits fünf Jahre später wurde diese Strategie deutlich verschärft und als neues Ziel die Klimaneutralität der maritimen Schifffahrt für das Jahr 2050 anvisiert bzw. von den Mitgliedern der IMO verabschiedet.

Dieses Ziel ist, vor allem im Kontext von schwer zu defossilisierenden Sektoren wie der maritimen Schifffahrt, als ambitioniert zu sehen. Fossile Kraftstoffe sind durch ihre immense Energiedichte schwer zu substituieren. Eine Elektrifizierung mit BEV (Battery Electric Vehicles), wie sie vor allem im PKW-Bereich vorangetrieben wird, kann nur sehr bedingt als Lösung herangezogen werden. Als Aufgabe stellt sich die Suche nach alternativen Kraftstoffen, welche ähnliche Energiedichten wie Dieselkraftstoff haben. Der Einsatz von Kraftstoffen erlaubt, im Gegensatz zur Elektrifizierung, auch die Möglichkeit einer Umrüstung (Retrofitbarkeit) von diesen Motoren, welche zum Teil deutlich über 25 Jahre im Schiffseinsatz sind.

Im Laufe der letzten Jahre haben sich besonders zwei Kraftstoffe als Favoriten für den Ersatz von Dieselkraftstoff herauskristallisiert. Das sind zum einen, CO₂-neutral hergestelltes Methanol, sowie Ammoniak, welches komplett ohne Kohlenstoff aufgebaut ist.

Die MAN Energy Solutions treibt für diese beiden Energieträger Entwicklungen voran, die sowohl im Neubau als auch im Retrofit Verwendung finden sollen. Das Paper zeigt die Grundlagen dieser Kraftstoffe für den Einsatz in Verbrennungskraftmaschinen und gibt einen Einblick in die Entwicklungstätigkeit für die Verbrennung derselbigen.

1. Assessment of Different Energy Carriers for Maritime Applications

Storage on board

For all long-distance remote applications without the possibility of refueling, the energy density of the energy source is of crucial importance. In the following diagram (Figure 1), a comparison of different energy carriers with respect to their volumetric energy density and gravimetric energy density is given.

Heavy 🔶		E		Light weight	Requir less space
Requires less spa than diesel	ace but heavier		Requires less space and lighter than diesel	e Liquid	
	Coal Blodiesel	Diesel Synthetic diesel		Hydrogen based Liquefied gas	
Requires more space and				Natural gas Solid	
diesel	Methanol	LNG	Requires more space but lighte than diesel	r	
	Ammonia	CNG 200 bar		LH ₂ 20.3 K CGH ₂ 700 bar	Poqui
NMC Battery o	ell	Natural gas		CGH ₂ 350 bar	more
0	20 4	0 60 Gravimetric	80 10 enerav density - MJ/ka	0 120	space

Figure 1: Comparison of gravimetric and volumetric energy density of different energy carriers [1]

The dots are based on the physical properties, while the blue arrows in the diagram indicate the energy density with the specific tank volume taken into account. It is obvious, that Diesel and Diesel-like fuels set the benchmark regarding volumetric and gravimetric energy density. In extreme contrast, batteries are very poor with regard to these criteria and simply not suitable for long-distance applications. Only liquid fuels and liquefied gases are within reach of the Diesel's energy density. In this context the added complexity for the use of hydrogen has to be mentioned.

Economical aspects

The following diagram gives an overview of the energy efficiency of the production processes for different e-fuels.



Figure 2: Comparison of needed energy during the production process of different e-fuels [2] – CO₂ sources: SMR: Steam Methane Reforming, DAC: Direct Air Capture

As hydrogen is the basis for all other e-fuels, it is not surprising that the production process for hydrogen has the highest efficiency. As a rule, the longer the atomic chains of the fuels become, the lower the production efficiency gets.

Even more important are the costs for the production of e-fuels. These are compared in the following diagram (Figure 3). As already mentioned, all e-fuels are produced with hydrogen on the basis of electrolysis. One could therefore conclude that hydrogen is the cheapest e-fuel. However, as other costs also play a role, such as construction of refueling stations and fuel distribution itself, hydrogen is in the end not the cheapest efuel.



Figure 3: Production cost comparison for different e-fuels in 2020 [2]

The specific cost distribution of the complete production process for the different efuels is highlighted for three European regions (N=North, C=Central, S=South). The CO_2 feedstock is based on a concentrated CO_2 source (e.g. from the cement industry). Thereby showing that methanol is the second cheapest fuel only trailing ammonia. Another important aspect is the price development over the upcoming years.

The values and diagrams are based on the assumption that the fuels are produced in Europe. In the global maritime shipping industry, the transport costs for the fuels are of great importance and play a decisive economic role in determining where the fuels will be produced. The following diagram (Figure 4) compares a selection of future marine fuels in terms of transport costs on a representative route from Oman to Japan, a distance of about 8000 km.

It is quite obvious that methanol is an attractive fuel in terms of transport costs, while hydrogen is not a first choice, at least for long-distance transport. Therefore, ammonia imports are generally being considered when it comes to hydrogen imports, as ammonia serves as a better energy carrier than hydrogen itself.



Figure 4: Transportation costs for future fuels from Oman to Japan [3]

One of the drivers for transport prices are the costs for reliquefication of the boil-of-gas (BOG-Costs). The following table shows the boiling point under atmospheric conditions. Due to its physical properties, methanol can be stored under atmospheric conditions without boil-off and thus expensive countermeasures.

	Diesel	Methanol	Ammonia	LNG	Hydro-
					gen
Normal boiling point [°C]	>120	64	-33	-161	-253

Table 1: Comparison of boiling points for different fuels

These economic fuel cost assessments for various e-fuels show that methanol and ammonia are the most promising fuels for maritime applications in the future. Yet, hydrogen could also become attractive in the distant future. Thus, the following sections focus on these three fuels as well as e-LNG, also called synthetic Methane. The reason for including e-LNG is quite simple: As LNG-technology on ships is already state of the art and is becoming increasingly widespread, fossil LNG can fully be substituted by up to 100% CO₂-neutral e-LNG without having to make any changes to existing LNG-powered ships.

Final fuel assessment

The fuel assessment is summarized by the following overview (Figure 5) for the e-fuels methanol, ammonia, hydrogen and natural gas:

e-fuel	H ₂	CH ₄	MeOH	NH ₃	
energy density	-	+	++	+	1: H ₂ ind. GHG w. GWP ₁₀₀ ~11 (Warwick 2022) 2: CH ₄ slip GWP ₁₀₀ =28 (IPPC AR5)
production costs as e-fuel	0	0	+	++	3: risk of N ₂ O-emissions GWP ₁₀₀ =265 (IPPC AR5) 4: most studies show, that new ship design will be needed
transportation costs		++	++	+	
storability	-	0	++	+	
Risk of GHG (other than CO ₂)	+ 1	- 2	++	- 3	
Retrofitability (shipping industry)	0	0	++	- 4	
Power application + short distance shipping CO_2 -neutral \rightarrow drop in fuel	g I to NG			CO ₂ -ne	Fuel for new built ships eutral → retrofit of Diesel-engines

Figure 5: Fuel assessment summary for maritime e-fuels [4]

The summary for the evaluated categories paints a clear picture. Methanol, as an efuel, is the most promising fuel overall. It is followed by ammonia, which will certainly play a crucial role in the future for the application in new ships, where safety issues can be solved with reasonable effort, e.g. container ships and ammonia transport ships. Furthermore, retrofits for ammonia will be important, where the ship design is suitable. Thus, many ships are already being designed and delivered as "ammoniaready". Methane, on the other hand, as an e-fuel, is ideal for reducing the net CO₂emissions of existing LNG-ships by blending it with fossil LNG, while hydrogen, as a e-fuel, will become relevant for power generation on land and probably for short-distance shipping.

2. Combustion Concepts for Methanol & Ammonia

The fuel properties determine whether a fuel is suitable for the Otto and/or Diesel combustion process. In this section, methanol and ammonia are evaluated as a fuel for dual-fuel applications with a Diesel-fuel back-up mode. Note that in most marine applications, for safety and redundancy reasons, a back-up mode is required for engines that do not run exclusively on Diesel. Diesel, at least for the time being, as well as in the future, is most probably the best back-up fuel, as it is available in all harbors around the world.

Table 2 summarizes the most important properties of methanol regarding its combustion behavior in an internal combustion engine (see next page).

Without an additional ignition source, the low cetane number disqualifies methanol as a fuel for Diesel-like, diffusive combustion. To realize a Diesel cycle, additives or ignition sources, such as a Diesel pilot fuel, are therefore necessary. The octane number and auto-ignition temperature, on the other hand, qualify methanol as an Otto-cycle fuel.

The cooling effect of injected liquid methanol in an internal combustion engine is comparatively high due to the latent heat of vaporization. In relation to the same calorific value, the cooling effect is around 5 times higher than with RON 91 Gasoline. Thus, in a Diesel-cycle, NO_x emissions are reduced significantly by this cooling effect compared to Diesel [7]. For the Otto-cycle, where a pilot fuel-oil injection is used as an ignition

34

source, the influence of the cooling effect on the ignition delay must be taken into account. The laminar flame speed and the boiling temperature are within the known range of common Otto-fuels. The viscosity of methanol and the lower calorific value are significantly lower than those of Diesel fuels. This has an impact on the injection system e.g. in terms of injection pressure, injector itself and nozzle design.

	Methanol	Ammonia	Comparison (Otto- /Diesel-fuel)
CN [-]	<5	-	DMA>40
ROZ [-]	106	>130	LNG<130
Auto ignition temp. [°C]	440	651	LNG: ~537
			DMA: ~220
Latent heat of evapora-	1101	1370	RON 91: ~420
Lower Calorific Value	15.8	11 7	PON 91: ~25
[MJ/I]	15.0	11.7	DMA: ~36
Laminar flame speed [cm/s]	55	15	LNG: ~40
Boiling temperature [°C]	65	-33	ROZ 91: 30-215

Table 2: Properties of methanol and ammonia as fuel

Furthermore, methanol as a molecule has only one C-atom. Therefore, extremely low soot emissions are to be expected in a Diesel-cycle. The main source for soot emissions is found in the pilot injection and lubricating oil used.

In conclusion, it can be said that methanol is suitable for both the Diesel- and the Ottocycle. In the Otto-cycle, combustion is restricted by the elongated ignition delay of the Diesel pilot-fuel due to the high cooling effect, and by a low resistance to knock due to the low RON compared to LNG. On the other hand, the Diesel-cycle requires an injection system that can not only inject both Diesel and methanol, but also must be able to realize full load or at least close to full load in both methanol and Diesel mode. It must also be ensured that the Diesel and methanol spray cones are orientated in relation to each other so that the Diesel plume can ignite the methanol plume.

3. Methanol Combustion Concepts – Port Fuel Injection as a Retrofit Solution

Methanol is suitable for both combustion concepts – Otto-cycle combustion and Diesel-Cycle combustion. Depending on the combustion process, the injection systems need to be chosen. For a Diesel Combustion Concept a high-pressure injection system is necessary in order to inject the fuel directly in the combustion chamber during the compression stroke. In contrast to an ordinary Diesel-fuel there is no autoignition, as the Cetane Number, see Table 2, is relatively low and high temperatures and high pressures would need to be present. This can be achieved by a relatively high compression ratio in combination with a high intake temperature. A more elegant way is to inject a small amount of Diesel which can be used as an ignition source. As a Diesel Backup Mode is mandatory because of several reasons, this pilot injection is always possible.
For the Otto-Cycle Combustion, a port fuel injection (PFI) system with reduced pressure in comparison to the above-mentioned High Pressure direct injection system is sufficient. The Fuel is injected during the intake stroke of the engine and through the airflow the atomization and vaporization can take place. Comparable to the Diesel Cycle the ignition will be done by a pilot amount of Diesel fuel, which – in this case – will ignite the homogenous air/fuel mixture.

It is easily understandable that the PFI System is the preferred solution when it comes to retrofit solutions, as the complete combustion chamber layout with the cylinderhead can remain unchanged and "only" a low-pressure port fuel injection system needs to be integrated.

That is the reason why the PFI Systems are dominantly seen as a big leap forward to decarbonize the existing fleet with the alternative fuels.

At MAN Energy Solutions, retrofit solutions for Methanol are under development. In below shown Figure 6, a 51/60R-DF M (the R stands for Retrofit) with a PFI system is displayed.





Figure 6: Rendering of the 48/60CR engine and 3D-PFI concept layout

In the MAN Energy Solutions Portfolio there are two big size engines available. One, the pure Diesel Engine, is a 48/60 and the Dual Fuel Engine for LNG Operation the 51/60DF. The 51/60DF is based on the 48/60 engine and offers through a bigger displacement the same power output as the 48/60 engine (Note: the BMEP of the LNG Engine is lower compared to the Diesel Engine). Both Engine types can be converted to the 51/60R-DF M in Methanol operation, offering a broad perspective for the ship owners to participate in the journey towards carbon-neutral shipping with their existing fleet.

In Figure 6 one can see the integration of the Port Fuel Injector in the intake manifold. With such a solution only minor changes are needed and the core engine with its parts will last. In case of a conversion of a 48/60 engine, additionally a conversion to a 51/60DF engine will be done automatically in order so sustain the needed power output. With such a conversion also the injection systems for the main fuel Diesel will be converted to the well-known Common Rail 1.6. The pilot fuel will be injected through a dedicated pilot fuel oil system on a CR basis. This allows a wide operation in Methanol mode and subsequently gives the ship owner an advantage on the possible CO_2 emission reduction strategy.

As uncomplicated as the positioning of a "small" PFI injector in the intake air manifold looks, as complicated are the details. For the PFI / Otto Cycle Combustion to succeed, the highest possible homogenization of the fuel with the air is needed. Therefore, intensive studies of the air flow with the spray of the injector are carried out in order to understand the mixture formation and avoid splashing wetting effects in the intake manifold, see Figures 7 and 8.



Figure 7: CFD simulation model with methanol injectors for position 1 and position 2



Figure 8: Spray distribution (left) and wall temperature (right) for position 1 and position 2

In Figure 8 one can see that the position of the injector can make a huge difference in the mixture formation and thus needs to be optimized in the beginning of the development.



4. Ammonia Combustion Concepts – High Pressure Injection

Basically, the same line of thoughts for the distinction of a Diesel and an Otto cycle in Methanol applies to the Ammonia combustion as well. Both combustion processes can be used. Due to the fuel properties in Table 2, Ammonia combustion is more challenging – in both combustion regimes.

For a high-pressure injection of Methanol, comparable injection concepts are used, although the injector needs to be manufactured from special steels, which resist corrosion. From a thermodynamic point of view, the ignition is more difficult, as the autoignition temperature of Ammonia is higher and the latent heat of evaporation is higher. Therefore, the temperature before ignition is lower and can cause troubles in the ignition of the ammonia spray plumes by the diesel-like fuel. Ammonia can also be burnt in an Otto-cycle combustion process, where the high energy amount for the ignition is still a challenge, when the fuel is homogeneously mixed with air. In the premixed combustion of Ammonia, N₂O is formed and can be emitted after the combustion. In a premixed Otto-cycle combustion process these emissions are higher than for the high-pressure injection (Diesel Combustion Less flame quenching effects and unburnt N₂O emissions can be exhaled by the engine. As N₂O is a very effective greenhouse gas, and its GWP is determined to 265, the N₂O-Slip emissions needs to be prevented under all possible circumstances.

Therefore, advanced investigations have been started for the combustion of Ammonia with a high-pressure injection system in a funded research project "Ammonia Mot".

The engine investigations have been carried out on a highspeed single cylinder research engine, see table, with a Woodward L'Orange prototype direct injection system for alternative fuels [5].

Parameter	Unit	Value
Bore	mm	175
Stroke	mm	215
Piston Displacement	dm ³	5.17
Rated power	kW	180
Rated speed	min ⁻¹	1800
Number of valves	-	4

Table 3: Parameters of the 1L research engine [4]

The results for the Ammonia Combustion can be seen as very promising. The N₂O emissions have been kept in under 10 ppm. The combustion stability, which was a worrying parameter in the beginning, could be set to Diesel like results. That was all achieved with an ammonia share of over 95%. An overall Greenhouse gas emission reduction of over 90% was achieved. The residual CO₂ emissions were formed by the diesel pilot fuel. In future this value can be even higher, when HVO for example as a CO₂ neutral is used as a pilot fuel alternative.



Figure 9: Single cylinder highspeed engine for ammonia combustion investigations

5. Summary

Methanol and Ammonia are the mostly discussed alternative fuels when it comes to deep-sea shipping and the defossilisation of the marine sector, set by the IMO to be completely CO_2 -neutral. In general, and due to the fuel properties, both fuels can be used either in Diesel-Mode or in premixed-Otto Cycle Combustion.

As Methanol has less impact on the ship design, it is more likely to be used already now as a retrofit solution. Ammonia-operation on a ship requires more changes to the ship design, especially in terms of safety. Therefore, Ammonia is seen, side by side with Methanol, more a as future fuel for new builds.

In this paper two examples are shown for the combustion of these new fuels. Methanol retrofits will play a major role in near future. Therefore, MAN ES developed a solution for an upgrade of its engine with a port fuel injection system.

The ammonia combustion is more challenging. Therefore, advanced research together with universities and other cooperation partners was carried out. It could be shown that with a high-pressure injection system diesel like combustion results can be achieved. Even the N_2O slip can be reduced to a bare minimum to allow a real reduction in greenhouse gas emissions.



Literature

- [1] DNV GL Report No. 2019-0567, Rev. 4
- [2] Alba Soler et al. E-Fuels: A techno-economic assessment of European domestic production and imports towards 2050
- [3] Al Breiki et al. Energy Reports Volume 6, November 2020, Pages 1897-1909
- Kunkel, Ch. et. al. 44th Motorship Propulsion & Future Fuel Conference Hamburg, 2023.
- [5] Bärow et al. Alternative Kraftstoffe und Einspritzsysteme, JFRG Conference 2022.

Acknowledgments

The investigations on the single cylinder engine, the CFD-simulation (partly) and evaluation of the combustion concepts were funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action on the basis of a decision by the German Bundestag (project no. 03SX585A), which is gratefully acknowledged. In this context the authors would like to acknowledge the collaboration and support of the CliNeR-ECo project-partners WTZ Roßlau gGmbH and the University of Darmstadt.

The research on the Ammonia Combustion was carried out within the funded Project "Ammonia Mot" on the basis of a decision by the German Bundestag, which is gratefully acknowledged.

Supported by



Federal Ministry for Economic Affairs and Energy

on the basis of a decision by the German Bundestag



OME – Potenziale und Herausforderungen auf dem Weg zum klimaneutralen und schadstofffreien Dieselmotor

Alexander D. Gelner

Abstract

Polyoxymethylendimethylether (OME) sind Oligomere aus der Gruppe der Oxygenate. Sie gelten als vielversprechende Alternative zu fossilem Dieselkraftstoff, da sie zum einen als klimaneutrale e-Fuels herstellbar sind, zum anderen aufgrund ihrer rußfreien Verbrennung neue Freiheitsgrade in der Brennverfahrensentwicklung und der Abgasnachbehandlung ermöglichen. Dieser Beitrag fasst die Untersuchungen einer Dissertation an der Technischen Universität München zusammen, die Potenziale zum Einsatz von OME in einem Nutzfahrzeugdieselmotor aufzeigt. Neben der experimentell und simulativ ermittelten pareto-optimalen Einspritzstrategie beschreibt die Arbeit die Charakterisierung der Nanopartikelemissionen. Sie enthält Untersuchungen zur Selektivität und Konvertierungseffizienz der Komponenten eines potenziellen Euro-VII-Abgasnachbehandlungssystems und die Demonstration von Niedrigstemissionen im WHSC- und WHTC-Zyklus. Kaltstartversuche mit der Bewertung zweier Aufheizstrategien runden die Arbeit ab. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen zeigen ebenso Methoden für die Charakterisierung anderer alternativer Kraftstoffe wie Wasserstoff auf. Darüber hinaus dienen sie auch als Grundlage für den Einsatz von OME als Pilotkraftstoff für Zündstrahlmotoren, wie sie vorrangig in Blockheizkraftwerken und Schiffsantrieben Verwendung finden.

1. Einleitung

Es ist allgemein anerkannt, dass die Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens der Vereinten Nationen die Reduktion der anthropogenen Treibhausgasemissionen voraussetzt [1]. Der Fokus liegt dabei auf Kohlenstoffdioxid (CO₂), welches vor allem aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe stammt [2]. Für die Sicherstellung der zukünftigen Energieversorgung ist daher die Substitution dieser Brennstoffe durch erneuerbare Alternativen notwendig, allen voran Strom aus Wind- und Sonnenenergie. Lokale Unterschiede und zeitliche Schwankungen der Verfügbarkeit setzen die Speicherung und den Transport des erneuerbaren Stroms voraus [3], insbesondere durch ein zeitweises Überangebot [4]. Die strombasierte Synthese flüssiger Energieträger sogenannter e-Fuels – aus Wasserstoff (H₂) und CO₂ dient dabei nicht nur der Speicherung und Distribution verfügbarer erneuerbarer Energie, sondern ermöglicht auch den klimaneutralen Betrieb von Verbrennungsmotoren, die bereits im Mobilitäts- und Energiesektor im Einsatz sind [5]. Neben e-Fuels mit ähnlicher chemischer Zusammensetzung wie ihr fossiler Gegenpart, gibt es auch Kraftstoffe mit veränderten chemischen Eigenschaften, die Vorteile in der Verbrennung mit sich bringen. Für Dieselmotoren bietet sich eine Mischung aus langkettigen Polyoxymethylendimethylethern (OME) bei ähnlichen physikalischen Eigenschaften wie fossiler Diesel als ein vielversprechender Substitutionskandidat an [6]. Grund hierfür ist die rußfreie Verbrennung, die auf die Abwesenheit von innermolekularen C-C-Bindungen zurückzuführen ist. Damit löst sich der typische innermotorische Zielkonflikt zwischen Stickoxid- (NO_x) und Rußemissionen auf [7]. Bisherige Untersuchungen zum Potenzial von OME als Dieselersatzkraftstoff basieren allerdings auf Hypothesen [8] und Einzylinderforschungsmotoren [9], oder beschränken sich auf stationäre Betriebspunkte mit geringer Motorlast 10] und die isolierte Betrachtung fester Partikelemission nach Euro 6. Ziel der in diesem Beitrag vorgestellten Dissertation [11] ist daher neben fundamentalen Untersuchungen zur Betriebsstrategie von OME-Motoren und des Abgasnachbehandlungssystems auch die realitätsnahe Demonstration des Potenzials in homologationsrelevanten Fahrzyklen.

2. Methodik

Im Rahmen der Untersuchungen kommen verschiedene Versuchsträger zum Einsatz:

- Ein Einspritzverlaufsindikator (EVI), basierend auf dem Prinzip des Bosch-Rohrs [12] zur Charakterisierung des Injektorverhaltens und zur Ermittlung der für die Kalibrierung des 0D-/1D-Motorsimulationsmodells zur Arbeitsprozessrechnung und der hydraulischen Injektorsimulation notwendigen Einspritzraten,
- ein von einem Nutzfahrzeug abgeleiteter Einzylinderforschungsmotor mit Vollindizierung für die Kalibrierung des pr\u00e4diktiven Verbrennungsmodells in der 0D-/1D-Simulationsumgebung,
- ein MAN D0824LFL79-Nutzfahrzeugmotor mit Dieseloxidationskatalysator (DOC) zur Untersuchung der kraftstoffbasierten Aufheizstrategie,
- ein MAN D2676LF51-Nutzfahrzeugmotor mit modularer Abgasnachbehandlung (AGN) zur Demonstration in den Fahrzyklen und die Charakterisierung der Wechselwirkungen im AGN-System sowie der Nanopartikelemissionen.

Die detaillierte Beschreibung der Versuchsträger und die verwendete Messtechnik ist in den zur Dissertation gehörigen Publikationen [13-17] zu finden.

Als Testkraftstoff dient neben fossilem Diesel nach DIN EN 590 als Referenzkraftstoff eine OME-Mischung nach dem Normentwurf M DIN TS 51699. OME lassen sich mit der Strukturformel CH₃-O-(CH₂O)_n-CH₃ beschreiben. n gibt die Anzahl der Oxymethylengruppen an, weshalb sich die Schreibweise OME_n etabliert hat. Für ähnliche fossile Eigenschaften wie fossiler Diesel ist eine Mischung aus OME der Kettenlängen 3 – 5 notwendig. Diese Mischung aus ist im weiteren Verlauf dieses Beitrags vereinfachend als OME abgekürzt. Der Normentwurf M DIN TS 51699 für den Einsatz von OME als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren zielt auf die Werte und Messverfahren der DIN EN 590 ab, definiert aber für manche Eigenschaften wie die Cetanzahl oder den Flammpunkt strengere Werte. Tabelle 1 stellt die beiden Normen gegenüber.



Tabelle 1: Gegenüberstellung der Stoffwerte nach Gelner [11] von handelsüblichem Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 und OME-Kraftstoff entsprechend des Normentwurfs M DIN TS 51699

Eigenschaft	Diesel	OME			
Spezifiziert in beiden Normen	DIN EN 590	M DIN TS 51699			
Cetanzahl	≥ 51	≥65			
Dichte bei 15 °C	820 - 845 kg/m ³	1045 - 1070 kg/m ³			
Kinematische Viskosität bei 40 °C	$2,000 - 4,500 \text{ mm}^2/\text{s}$	$0,900 - 1,500 \text{ mm}^2/\text{s}$			
Schmierfähigkeit	\leq 460 μ m	\leq 460 μ m			
Flammpunkt	≥ 55 °C	$\geq 60 \ ^{\circ}\text{C}$			
Cold Filter Plugging Point (CFFP)	\leq -20 – 0 °C *	Ist anzugeben**			
Oxidationsstabilität	\geq 20 h	≥ 240 min (bei 120 °C)			
Schwefelgehalt	$\leq 10 \text{ mg/kg}$	\leq 5 mg/kg			
Wassergehalt	\leq 0,020 vol-%	\le 0,020 vol-%			
Gesamtverschmutzung	\leq 24 mg/kg	\leq 15 mg/kg			
Nicht spezifiziert in der Norm DIN EN 590					
Formaldehydgehalt	-	\leq 200 mg/kg			
Trioxangehalt	-	$\leq 1000 \text{ mg/kg}$			
Peroxidzahl	-	$\leq 10 \text{ meq O/g}$			
Säurezahl	-	$\leq 10 \text{ mg KOH/g}$			
Gefrierpunkt	-	≤ - 20 °C			
Unterer Heizwert	-	Ist anzugeben**			

* Je nach Jahreszeit, festgelegt in DIN EN 590. | ** Ist anzugeben, aber nicht beschränkt.

3. Untersuchungen

3.1 Betriebsstrategie und Injektorverhalten

Die Publikation Engine Operation Strategies with the Alternative Diesel Fuel Oxymethylene Ether (OME): Evaluation Using Injection Rate Analyzer and 0D-/1D-Simulation [13] präsentiert mittels 0D-/1D-Simulation eine für OME hinsichtlich des Wirkungsgrades und der NO_x-Emissionen pareto-optimale Motorbetriebsstrategie. Grundlage für die Kalibrierung des Modells bilden Druckverlaufsanalysen und Emissionsmessungen am Einzylinderforschungsmotor sowie am EVI ermittelte Einspritzverläufe.

Die Ermittlung der notwendigen Stoffwerte von OME macht die Erzeugung eines Fluidobjekts in der Bibliothek der Simulationsumgebung möglich und ist Voraussetzung für die Kalibrierung eines prädiktiven OME-Verbrennungsmodells. Der Einspritzverzug bei OME ist größer als im Dieselbetrieb und die Schließgeschwindigkeit ist geringer. Zusätzlich ist der Massenstrom bei vollständig geöffnetem Injektor höher. Eine dezidierte hydraulische Simulation des Injektors ergibt den in Abbildung 1 dargestellten Einfluss der Viskositäts- und Dichteunterschiede von OME und Diesel auf das Injektorverhalten.



Abbildung 1: Einfluss von Dichte ρ und dynamischer Viskosität μ der Kraftstoffe auf Nadelhub, Steuerraumdruck und Massenstrom des Injektors nach Gelner [11].

Aufgrund der höheren Cetanzahl von OME wird die im Dieselmotor übliche Voreinspritzung obsolet. Der Verzicht auf die Voreinspritzung vereinfacht die Einspritzstrategie und wirkt sich nicht negativ auf das Verbrennungsgeräusch, den Wirkungsgrad oder die NO_x-Emissionen aus. Abbildung 2 zeigt die Variation der Parameter Einspritzbeginn, Raildruck und Rate der Abgasrückführung (AGR) jeweils mit und ohne Voreinspritzung sowie die sich daraus ergebenden Pareto-Fronten. Injektor 2 verfügt über eine Düse mit größerem Durchfluss als Injektor 1. Dies verbessert die Wirkungsgrad-NO_x-Paretofront ebenfalls.



Abbildung 2: Simulierte Paretofronten hinsichtlich NO_x-Emissionen und Wirkungsgrad mit und ohne Voreinspritzung für unterschiedliche Motorbetriebspunkte mit den Variationsgrößen Einspritzbeginn, Raildruck und AGR-Rate nach [13]).



3.2 Nanopartikelemissionen

Die Publikation Particle Emissions of a Heavy-Duty Engine Fueled with Polyoxymethylene Dimethyl Ethers (OME) [14] enthält den Vergleich der Partikelgrößenverteilungen im OME- und Dieselabgas sowie eine Unterscheidung zwischen volatilen und nichtvolatilen Nanopartikeln. Sie enthält darüber hinaus die Beschreibung einer speziell konzipierten Abgasprobenahme in Anlehnung an die Vorgaben des Particle Measurement Programme der UNE/ECE. Diese Probenahme ermöglicht die detaillierte Untersuchung der Partikelgrößenverteilungen sowohl im OME- als auch im Dieselbetrieb und ist auch für andere rußfreie Kraftstoffe wie Wasserstoff einsetzbar. Die Untersuchung zeigt über den Vergleich der Partikelanzahlkonzentration (PN) mit und ohne Catalytic Stripper (CS) auf, dass die Nukleationsmode im OME-Betrieb überwiegend volatilen Ursprungs ist. Damit sind diese Partikel zum einen nicht in der Abgasgesetzgebung reglementiert, zum anderen setzt ein AGN-System mit DOC zu CO₂ und Wasser um.



Abbildung 3: Partikelgrößenverteilung im Rohabgas Diesel und OME, ermittelt über konzipierte Abgasprobenahme nach Gelner [11].

Vergleichsmessungen im Rohabgas und am Endrohr zeigen, dass das Abgasnachbehandlungssystem sowohl volatile als auch feste Partikel mit einer Filtrationseffizienz (FE) von bis zu 99,99 % entfernt. Abbildung 4 zeigt, dass die Harnstoffdosierung zur NOx-Reduktion Sekundärpartikel insbesondere im Größenbereich unter 23 nm hervorbringt, was für die Reglementierung von PN₁₀ in der kommenden Euro-7/VII-Gesetzgebung relevant werden wird. Dieses Phänomen wird ebenfalls für mit Wasserstoff betriebene Verbrennungsmotoren weiterhin näher zu untersuchen sein.

Wie in der Publikation demonstriert, unterschreiten die Partikelemissionen im OME-Betrieb dennoch in den homologationsrelevanten Fahrzyklen "World Harmonised Steady State Cycle" (WHSC) und "World Harmonised Transient Cycle" (WHTC) nach der Regelung Nr. 49 der UN/ECE (UN/ECE R49) den Grenzwert der Emissionsstufe Euro VI. Dies gilt ebenso für den derzeit diskutierten Grenzwert der zukünftigen Stufe Euro VII, selbst ohne die Verwendung eines DPF. Mithilfe eines DPF unterschreiten die Partikelkonzentrationen das durchschnittliche Hintergrundniveau urbaner und regionaler Gebiete in Deutschland.



Endrohr: OME einstufig mit CS

Abbildung 4: Einfluss der Harnstoffdosierung auf die Partikelkonzentration nach Gelner [14].

Die Beimischung von OME in fossilen oder paraffinischen Dieselkraftstoffen ermöglicht die Reduktion der Rußemissionen. Der genaue Zusammenhang zwischen der ausgestoßenen Rußmenge und dem OME-Anteil in einem Blend mit Diesel ist allerdings weitgehend ungeklärt. Der an der Yale University von *McEnally et al.* entwickelte Yield Sooting Index (YSI) beschreibt als dimensionslose Kenngröße die Rußneigung eines Kraftstoffes [18]. *Xiang et al.* formulieren darauf aufbauend eine lineare Mischungsregel. Diese Regel gibt die zu erwartende Rußneigung eines Blends auf Basis des YSI der Einzelkomponenten an [19]. Abbildung 5 zeigt die nach dieser Mischungsregel berechnete Rußneigung von OME-Blends in einem Dieselsurrogat nach *Fiorino et al.* [20] in Abhängigkeit der Blendrate sowie die experimentelle Validierung.



Abbildung 5: Berechnete Rußneigung von OME-Diesel-Blends und experimentelle Validierung nach Gelner (11).

3.3 Demonstration der Fahrzyklen

48

Die Publikation Ultra-Low Emissions of a Heavy-Duty Engine Powered with Oxymethylene Ether in Stationary and Transient Driving Conditions [15] präsentiert die Berechnung der u-Werte für OME. Diese sind für die spezifische Emissionsauswertung der Fahrzyklen WHSC und WHTC nach UN/ECE R49 notwendig. Die vorgestellte Demonstration erfordert die vollständige Umsetzung der NO_x-Emissionen im SCR-System. Am gewählten Versuchsträger kommt ein zweistufiges System mit einer dynamischen Regelung der AdBlue-Dosierung zum Einsatz. Diese Regelung enthält eine Verschränkung der beiden SCR-Stufen in der Dosierstrategie. Damit vermeidet sie den Zielkonflikt des NO_x-Schlupfs bei Mangeldosierung des NH₃-Schlupfs bei Überdosierung. Abbildung 6 stellt die eingesetzte Strategie schematisch dar.

Die Kenngröße α beschreibt analog zum Verbrennungsluftverhältnis λ das Verhältnis zu dosierter und für die vollständige NO_x-Reduktion notwendige AdBlue-Menge. Für die SCR-Katalysatoren ist ein NH₃-Speichermodell hinterlegt, dessen Eingangsgröße das Volumen, die Trägertemperatur T und die bereits dosierte AdBlue-Menge q sind. Im Kaltstart, bevor der hintere SCR-Katalysator seine Betriebstemperatur erreicht, erfolgt die AdBlue-Dosierung ausnahmslos am vorderen SCR-System über seine Speicherregelung. Eine Kennlinie ("Fader") gibt den dortigen Wechsel in die α -Vorsteuerung in Abhängigkeit der Temperatur der zweiten Stufe an. Im Dieselbetrieb erfordert die passive Regeneration des Dieselpartikelfilters eine Limitierung von α , um genügend NO₂ dafür vorzuhalten. OME ermöglicht aufgrund der rußfreien Verbrennung ein höheres α , was die Gesamtkonvertierungsrate des AGN-Systems erhöht. Steigende

Trägertemperatur an der zweiten Stufe führt zu NH₃-Ausspeicherung, weshalb die Verschränkung der beiden Stufen in Abhängigkeit der jeweiligen Temperaturen notwendig ist. Somit ist auch im OME-Betrieb kein α=1 möglich.



Abbildung 6: Schema der Dosierstrategie am zweistufigen SCR-System nach Gelner [11].



Abbildung 7: Darstellung des CH₄-NO_x-Zielkonflikts im OME-Betrieb im heißen WHTC am Endrohr bei unterschiedlichen AGR-Strategien nach Gelner [11].

In den Fahrzyklen unterschreiten die NO_x-Konzentrationen im Abgas die Nachweisgrenzen der homologationsrelevanten Abgasmesstechnik, ebenso wie alle anderen reglementierten Schadstoffe. Ausnahme bildet hier die Partikelanzahlkonzentration,

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. die allerdings unter dem Hintergrundniveau liegt. Darüber hinaus liegen auch die bisher nicht reglementierten Emissionen von Formaldehyd, Isocyansäure, Blausäure und OMEn unterhalb der Nachweisgrenze des eingesetzten Fourier-Transform-Infrarotspektrometers (FT-IR). Die Treibhausgase Methan (CH4) und Lachgas (N₂O) bilden einen Zielkonflikt mit der NO_x-Reduktion über AGR und selektive katalytische Reduktion (SCR). Da in der Untersuchung Kupferzeolithe zum Einsatz kommen, bildet sich über die dafür typische Konproportionierungsreaktion N₂O aus dem Reduktionsmittel Ammoniak (NH₃) und NO₂. Daher ist eine Absenkung des Roh-NO_x-Niveaus über AGR notwendig. Im dynamischen Betrieb führt dies zu CH4-Emission. Ein klimaneutraler Motorbetrieb setzt also eine SCR-Beschichtung mit ausreichender Selektivität und Effizienz voraus, mit einem Limit der AGR-Dynamik bis unter die CH4-Entstehungsgrenze. Abbildung 7 stellt den beobachteten CH4-NO_x-Zielkonflikt dar.

3.4 Kaltstartemissionen und Aufheizmaßnahmen

Die Publikation Gaseous Emissions in Transient Cold-Start Operation of a Heavy-Duty Engine Fueled with Polyoxymethylene Dimethyl Ethers and Methods for After-Treatment System Heating [17] präsentiert den Vergleich der Schadstoffemissionen im kalten und heißen WHTC. Dazu erfasst neben konventioneller Messtechnik in Form eines FT-IR auch ein speziell entwickeltes System mittels Massenspektrometer (MS) im sogenannten Non-Target-Screening Spezies im Abgas. Zur Reduktion der kalten, inaktiven Phase der Abgasnachbehandlung finden sowohl ein elektrisch beheizbarer DOC (e-DOC) als auch die Methode des Fuel Dosings Anwendung. Fuel Dosing bedeutet, dass eine späte Nacheinspritzung Kraftstoff für die Umsetzung am DOC bereitstellt. Diese Methode ist bei fossilem und paraffinem Dieselkraftstoff dadurch limitiert, dass sich Rußpartikel und unverbrannte Kohlenwasserstoffe als sogenanntes Face Plugging auf der DOC-Oberfläche niederschlagen und die katalytisch aktive Fläche belegen. Die Charakterisierung des Fuel Dosing mit OME geschieht bereits in der Publikation Fuel Dosing on a Diesel Oxidation Catalyst for After-Treatment System Heating on a Heavy-Duty Engine Powered by Polyoxymethylene Dimethyl Ethers [16]. Dort ist das reziproke Verhalten der Formaldehydemission im OME-Betrieb über die Nacheinspritzmenge am DOC aufgezeigt. Die Betrachtung der Sprungantwort liefert den Erklärungsansatz, dass die durch die exotherme Kohlenmonoxid- und Formaldehvdoxidation am DOC die Konvertierungseffizienz durch Anhebung der Oberflächentemperatur erhöht. Daher reduziert eine höhere Kraftstoffmenge in der Nacheinspritzung trotz steigender Formaldehydkonzentration im Rohabgas das Endrohrniveau dieses Schadstoffes.

Die mittels FT-IR gemessenen Konzentrationen von OME₃₋₅ im Rohabgas gelangen im Kaltstart aufgrund von Adsorptions- und Hydrolysevorgängen im AGN-System nicht bis ans Endrohr. So werden sie bei Erreichen der Light-Off-Temperatur des AGN-Systems im weiteren Verlauf des Zyklus konvertiert und finden sich nicht im Endrohrabgas wieder. Sowohl das FT-IR als auch das nachweisstärkere, kalibrierte MS-System detektieren dort keine unverbrannte OME₃₋₅-Rückstände, die oberhalb des ppb-Bereichs liegen. Den größten Anteil der im Kaltstart auftretenden Emissionen am Endrohr machen Formaldehyd und Ameisensäure aus. Die Auswertung der MS-Spektren zeigt, dass im Rohabgas sowohl im kalten als auch heißen WHTC-Lauf unverbrannte OME₃₋₅-Rückstände die höchsten Intensitäten aufweisen und im Non-Target-Screening keine weiteren Substanzen in vergleichbarer Größenordnung auftreten.

Elektrisches Beheizen des e-DOC reduziert den NO_x-Ausstoß um 47,7 % in der Kombination aus kaltem und heißem WHTC aufgrund des früheren Anspringzeitpunkts des SCR-Systems. Zusätzliches Fuel Dosing ermöglicht eine NO_x-Reduktion um insgesamt 64,9 %. Bei dieser Einspritzstrategie erhöht sich die im Kaltzyklus gemessene Formaldehydemissionen um 90,5 %, weshalb ein Kompromiss mit späterem Beginn der Nacheinspritzung notwendig ist. Ein solcher Kompromiss ergibt eine NO_x-Reduktion um 61,8 % und vermeidet zusätzliche Formaldehydemission.

3.5 Herausforderungen

Aufbauende Untersuchungen sind notwendig, um die Zukunftsfähigkeit von OME zur Substitution von Diesel in zukünftigen und bestehenden Motoren zu bewerten. Langzeiterprobungen ergeben, ob und inwieweit applikative und konstruktive Maßnahmen für einen langfristig sicheren Motorbetrieb erforderlich sind. Pélerin zeigt auf, dass durch die rußfreie Verbrennung die sonst übliche Rußschicht auf Bauteilen fehlt [21]. Diese Rußschicht hat korrosionsschützende und schmierende Eigenschaften, zum Beispiel im Bereich der Auslassventilsitzringe. Auch die chemischen Eigenschaften von OME sind zu berücksichtigen. So führt die Polarität der OME-Moleküle zu geänderten Wechselwirkungen mit Polymeren in Dichtungswerkstoffen im Kraftstoffsystem sowie zur Phasentrennung im Ölsystem [22]. Durch die höhere Dichte von OME setzt sich Kraftstoff im Schmieröl am Tankboden ab. Als alternative Schmieröle für OME bieten sich Polyalkylenglykolöle an, die bereits in Fahrzeugen mit Klimakompressoren Verwendung finden. Die Komponenten Kolben, Zylinderkopf und Injektoren sind allesamt für die Verwendung von fossilen Dieselkraftstoffen konzipiert und optimiert. Die geometrische Anpassung an den Einsatz von OME als Kraftstoff bietet daher noch Verbesserungspotenzial hinsichtlich des Wirkungsgrads und der Emissionsentstehung. Parallel zum Mobilitätssegment ist auch die Substitution von fossilem Diesel in stationären Verbrennungskraftmaschinen zur Strom- und Wärmeerzeugung denkbar. ebenso wie in Schiffsmotoren [23]. In diesen Anwendungen bietet OME aufgrund der rußfreien Verbrennung Potenzial als Pilotkraftstoff für Zündstrahlmotoren. In diesen Motoren ist ein Großteil der Gesamtrußemissionen auf den Pilotkraftstoff zurückzuführen [24]. Über Verbrennungskraftmaschinen hinaus bieten sich Feuerungsanlagen zur Wärmeerzeugung für den Einsatz von OME an. Diese gelten neben dem Transportsektor ebenso als Feinstaub- und Treibhausgasemittenten, weshalb ein Umstieg von Heizöl auf OME hier denselben Effekt hinsichtlich Klimaschutz und Luftreinhaltung hat. Die Voraussetzung für den breiten Einsatz von OME ist die Wirtschaftlichkeit der Produktion in ausreichenden Mengen. Diese ist maßgeblich von den Produktionskosten der Edukte Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff abhängig [25, 26]. Hierbei ergeben sich Koppeleffekte, da für die Energiewende eine Steigerung der Kosteneffizienz für diese beiden Ausgangsstoffe notwendig ist. Im Gegenzug dazu stehen die erwarteten Kostensteigerungen für fossile Energieträger.

4. Zusammenfassung

OME bietet als Alternativkraftstoff zu fossilem Diesel aufgrund der rußfreien Verbrennung und einer höheren Zündwilligkeit günstigere Eigenschaften als vergleichbare e-Fuels. Mithilfe dieser Eigenschaften sind Vereinfachungen im Motorensystem und der

Abgasnachbehandlung möglich sowie eine Reduktion des Rohemissionsniveaus bestehender Dieselmotoren. Die Untersuchung des Injektorverhaltens ergibt, dass der hvdraulische Einspritzverzug im OME-Betrieb größer als im Dieselbetrieb ist. Der Injektor schließt aufgrund der veränderten Dichte und Viskosität von OME im Vergleich zu Diesel langsamer. Die Variation der Betriebsparameter mittels 0D-/1D-Simulation zeigt, dass die Voreinspritzung aufgrund der höheren Cetanzahl obsolet wird. Ein Verzicht darauf wirkt sich nicht negativ auf die NO_x-Entstehung, das Geräuschverhalten und den Verbrauch aus. Die Erhöhung des Düsendurchflusses verbessert die Wirkungsgrad-NO_x-Paretofront. Die Charakterisierung der Nanopartikelemissionen zeigt. dass die Akkumulationsmode im OME-Betrieb um drei Größenordnungen geringere Konzentrationen als im Dieselbetrieb aufweist. Die Nukleationsmode mit einem Peak bei etwa 10 nm besteht vorwiegend aus volatilen Partikeln. Im OME-Betrieb liegt die Konzentration fester Partikel im Sub-23-nm-Bereich ebenfalls unter der im Dieselbetrieb. Das eingesetzte AGN-System entfernt sowohl volatile als auch feste Partikel mit einer Effizienz bis zu 99,99 %. Die AdBlue-Dosierung führt zu einem Anstieg der Partikelkonzentration im Sub-23-nm-Bereich. Der verwendete Versuchsträger unterschreitet sowohl mit als auch ohne Partikelfilter in den Fahrzyklen WHSC und WHTC den Euro VI- und diskutierten Euro VII-Grenzwert. Mit Partikelfilter liegt die Konzentration unterhalb des durchschnittlichen Hintergrundniveaus in deutschen städtischen und ländlichen Gebieten. Die Konzentrationen der restlichen reglementierten Schadstoffe liegt in beiden Fahrzyklen unterhalb der Nachweisgrenze der verwendeten Abgasmesstechnik. Bezüglich der Treibhausgase Methan und Lachgas ergibt sich ein Zielkonflikt mit den Maßnahmen der NO_x-Reduktion: Im Falle von Methan ergibt sich dieser Konflikt innermotorisch über die Begrenzung der Öffnungsdynamik der AGR-Klappe, im Falle von Lachgas über die unselektive Reduktion von NOx. Im Kaltstart liegen die Endrohrkonzentrationen unverbrannter OMEn aufgrund von Adsorptionsund Hydrolysevorgängen in der AGN im Bereich weniger ppb. OMEn macht dabei den Großteil der Kohlenwasserstoffemissionen aus. Den Großteil der Schadstoffemissionen allgemein machen Formaldehyd und Ameisensäure aus. Die Kombination aus elektrisch beheiztem DOC und Fuel Dosing ermöglicht eine Reduktion des NO_x-Ausstoßes in der WHTC-Prozedur von 61,8 %. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen zeigen ebenso Methoden für die Charakterisierung anderer alternativer Kraftstoffe wie Wasserstoff auf. Darüber hinaus dienen sie auch als Grundlage für den Einsatz von OME als Pilotkraftstoff für Zündstrahlmotoren, wie sie vorrangig in Blockheizkraftwerken und Schiffsantrieben Verwendung finden.

Literatur

- HOROWITZ, Cara A. Paris Agreement [online]. *International Legal Materials*. 2016, **55**(4), 740-755. Available from: 10.1017/S0020782900004253.
- [2] ALLEN, Myles R. Climate change 2014. Synthesis report. [Geneva]: [IPCC, WMO], 2015. 978-92-9169-143-2.
- [3] KÖNIG, Daniel H., Marcel FREIBERG, Ralph-Uwe DIETRICH, and Antje WÖRNER. Techno-economic study of the storage of fluctuating renewable energy in liquid hydrocarbons [online]. *Fuel.* 2015, **159**, 289-297. Available from: 10.1016/j.fuel.2015.06.085.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- [4] TRÜMPER, Sören Christian, Sebastian GERHARD, Stefan SAATMANN, and Oliver WEINMANN. Qualitative Analysis of Strategies for the Integration of Renewable Energies in the Electricity Grid [online]. *Energy Procedia.* 2014, **46**, 161-170. Available from: 10.1016/j.egypro.2014.01.169.
- [5] TREMEL, Alexander, Peter WASSERSCHEID, Manfred BALDAUF, and Thomas HAMMER. Techno-economic analysis for the synthesis of liquid and gaseous fuels based on hydrogen production via electrolysis [online]. *International Journal* of Hydrogen Energy. 2015, 40(35), 11457-11464. Available from: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.097.
- [6] SCHEMME, Steffen, Remzi Can SAMSUN, Ralf PETERS, and Detlef STOLTEN. Power-to-fuel as a key to sustainable transport systems – An analysis of diesel fuels produced from CO 2 and renewable electricity [online]. *Fuel.* 2017, 205, 198-221. Available from: 10.1016/j.fuel.2017.05.061.
- [7] PELLEGRINI, Leonardo, Mario MARCHIONNA, Renata PATRINI, Carlo BEATRICE, Nicola DEL GIACOMO, and Chiara GUIDO. Combustion Behaviour and Emission Performance of Neat and Blended Polyoxymethylene Dimethyl Ethers in a Light-Duty Diesel Engine. SAE Technical Paper Series: SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2012.
- [8] OMARI, Ahmad, Benedikt HEUSER, Stefan PISCHINGER, and Christoph RÜDINGER. Potential of long-chain oxymethylene ether and oxymethylene etherdiesel blends for ultra-low emission engines [online]. *Applied Energy*. 2019, 239, 1242-1249. Available from: 10.1016/j.apenergy.2019.02.035.
- [9] PÉLERIN, Dominik, Kai GAUKEL, Martin HÄRTL, Eberhard JACOB, and Georg WACHTMEISTER. Potentials to simplify the engine system using the alternative diesel fuels oxymethylene ether OME1 and OME3–6 on a heavy-duty engine [online]. *Fuel.* 2020, **259**, 116231. Available from: 10.1016/j.fuel.2019.116231.
- [10] STEINHAUS, Tim, Alexander MOKROS, Mikula THIEM, Markus MÜNZ, and Christian BEIDL. Ultra-low emissions with OME at the CI engine – Implementation and potential for reduction of the immission level: UNSPECIFIED, 2020.
- [11] GELNER, Alexander Daniel. OME als Wegbereiter klimaneutraler und schadstofffreier Dieselmotoren. München: Universitätsbibliothek der TU München, 2023.
- [12] BOSCH, Wilhelm. The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument For Display of the Characteristics of Individual Injection. SAE Technical Paper Series: SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1966.
- [13] GELNER, Alexander D., Rudolf HÖß, Andreas ZEPF, Martin HÄRTL, and Georg WACHTMEISTER. Engine Operation Strategies for the Alternative Diesel Fuel Oxymethylene Ether (OME): Evaluation Based on Injection Rate Analyzer and 0D-/1D-Simulation. SAE Technical Paper Series: SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2021.
- [14] GELNER, Alexander D., Dieter ROTHE, Carsten KYKAL, Martin IRWIN, Alessandro SOMMER, Christian PASTOETTER, Martin HÄRTL, Malte JAENSCH, and Georg WACHTMEISTER. Particle emissions of a heavy-duty engine fueled with polyoxymethylene dimethyl ethers (OME) [online]. *Environmental Science: Atmospheres.* 2022, **2**(2), 291-304. Available from: 10.1039/d1ea00084e.

- [15] GELNER, Alexander D., Harald A. BECK, Christian PASTOETTER, Martin HÄRTL, and Georg WACHTMEISTER. Ultra-low emissions of a heavy-duty engine powered with oxymethylene ethers (OME) under stationary and transient driving conditions [online]. *International Journal of Engine Research*. 2022, 23(5), 738-753. Available from: 10.1177/14680874211047922.
- [16] GELNER, Alexander D., Christian PASTOETTER, Harald A. BECK, Martin HÄRTL, and Georg WACHTMEISTER. Fuel Dosing on a Diesel Oxidation Catalyst for After-Treatment System Heating on a Heavy-Duty Engine Powered by Polyoxymethylene Dimethyl Ethers. SAE Technical Paper Series: SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2020.
- [17] GELNER, Alexander D., Genny A. PANG, Markus WEBER, Christoph HAISCH, Harald A. BECK, Christian PASTOETTER, Martin HÄRTL, Malte JAENSCH, and Georg WACHTMEISTER. Gaseous emissions of a heavy-duty engine fueled with polyoxymethylene dimethyl ethers (OME) in transient cold-start operation and methods for after-treatment system heating [online]. *Environmental Science: Advances.* 2022, 1(4), 470-482. Available from: 10.1039/D2VA00080F.
- [18] MCENALLY, Charles S., Yuan XUAN, Peter C. ST. JOHN, Dhrubajyoti D. DAS, Abhishek JAIN, Seonah KIM, Thomas A. KWAN, Lance K. TAN, Junqing ZHU, and Lisa D. PFEFFERLE. Sooting tendencies of co-optima test gasolines and their surrogates [online]. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019, **37**(1), 961-968. Available from: 10.1016/j.proci.2018.05.071.
- [19] XIANG, Zhanhong, Karnsiree CHEN, Charles MCENALLY, and Lisa PFEFFERLE. Sooting tendencies of diesel fuel component mixtures follow a linear mixing rule, 2022.
- [20] FIORONI, Gina, Lisa FOUTS, Jon LUECKE, Derek VARDON, Nabila HUQ, Earl CHRISTENSEN, Xiangchen HUO, Teresa ALLEMAN, Robert MCCORMICK, Michael KASS, Evgueni POLIKARPOV, Goutham KUKKADAPU, and Russell A. WHITESIDES. Screening of Potential Biomass-Derived Streams as Fuel Blendstocks for Mixing Controlled Compression Ignition Combustion [online]. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility. 2019, 1(3), 1117-1138. Available from: 10.4271/2019-01-0570.
- [21] PÉLERIN, Dominik. Potentiale der synthetischen Kraftstoffe Oxymethylenether und Dimethylether zur Realisierung klimaneutraler, schadstoffarmer sowie vereinfachter Dieselmotoren. 1. Auflage. München: LVK Lehrstuhl f. Verbrennungskraftmaschinen, 2021. 978-3-943813-32-6.
- [22] COSIMBESCU, Lelia, Kristen B. CAMPBELL, Tracy J. BAKER, Marie SWITA, and Daniel J. GASPAR. The quest for efficient oxygenated fuels: Examining interactions between lubricant components and oxygenates [online]. *Fuel.* 2021, 288, 119728. Available from: 10.1016/j.fuel.2020.119728.
- [23] FRANKL, Stephanie G., Alexander D. GELNER, Stephan GLEIS, Martin HÄRTL, and Georg WACHTMEISTER. Numerical Study on Renewable and Sustainable Fuels for HPDF Engines. ASME 2020 Power Conference: American Society of Mechanical Engineers, 2020.
- [24] JONES, H. L., G. P. MCTAGGART-COWAN, S. N. ROGAK, W. K. BUSHE, S. R. MUNSHI, and B. A. BUCHHOLZ. Source Apportionment of Particulate Matter

from a Diesel Pilot-Ignited Natural Gas Fuelled Heavy Duty DI Engine. *SAE Technical Paper Series:* SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2005.

- [25] MANTEI, Franz, Ramy E. ALI, Cornelie BAENSCH, Simon VOELKER, Philipp HALTENORT, Jakob BURGER, Ralph-Uwe DIETRICH, Niklas von der ASSEN, Achim SCHAADT, Jörg SAUER, and Ouda SALEM. Techno-economic assessment and carbon footprint of processes for the large-scale production of oxymethylene dimethyl ethers from carbon dioxide and hydrogen [online]. *Sustainable Energy & Fuels.* 2022, 6(3), 528-549. Available from: 10.1039/d1se01270c.
- [26] RODRÍGUEZ-VALLEJO, Daniel F., Antonio VALENTE, Gonzalo GUILLÉN-GOSÁLBEZ, and Benoît CHACHUAT. Economic and life-cycle assessment of OME 3–5 as transport fuel: a comparison of production pathways [online]. *Sustainable Energy & Fuels.* 2021, **5**(9), 2504-2516. Available from: 10.1039/d1se00335f.

Mario Lichtenberg, Max Linier

Abstract

The Deutsche Bahn AG (DB) is pursuing innovative strategies to make rail transport climate-neutral by integrating alternative fuels such as hydrotreated vegetable oil (HVO), hydrogen, and ammonia. The goal of these efforts is to operate DB's diesel vehicle fleet completely CO₂-free by 2040.

HVO as a Transitional Solution: HVO is positioned as an effective intermediate solution that enables a significant reduction in CO_2 emissions. Since its testing phase in 2019, HVO has achieved a reduction in CO_2 emissions of approximately 90% without the need for extensive technical modifications to existing vehicles. Its successful regular use, exemplified by the Sylt Shuttle, demonstrates the practicality and efficiency of HVO as a sustainable alternative to conventional diesel.

Hydrogen Technologies: The article further emphasizes the central role of hydrogen as a key technology for CO₂-free mobility. Hydrogen engines, characterized by high power density and the absence of CO₂ emissions during combustion, are presented as a robust and flexible alternative to traditional diesel engines. Their compatibility with existing vehicles and infrastructures makes them particularly attractive for use in rail transport.

Ammonia as a Fuel Alternative: Due to its higher energy density compared to compressed hydrogen, ammonia is discussed as a forward-looking fuel alternative for heavy-duty rail transport. The development of an ammonia-hydrogen engine in cooperation with industrial partners illustrates the endeavor to use ammonia as an efficient energy source in rail transport, thereby playing a significant role in energy conversion and storage.

Summary of Initiatives: The documented measures demonstrate Deutsche Bahn's comprehensive commitment to the development and implementation of HVO as a short-term solution up to the long-term integration of hydrogen and ammonia technologies. This underscores DB's ambition to take a leading role in sustainable mobility and to transform its fleet towards complete CO_2 neutrality.

1. Einleitung

Die Deutsche Bahn (DB) steht vor einer Reihe von Herausforderungen und Möglichkeiten, um den Bahnverkehr noch klimafreundlicher zu gestalten, wobei diese unterschiedliche zeitliche Horizonte und Finanzierungsbedarfe aufweisen. Die Streckenelektrifizierung durch den Bau von Oberleitungen, als naheliegendste Lösung, führt zu fahrzeugseitig hohen Wirkungsgraden und ermöglicht bei Einsatz von 100 % Ökostrom eine vollständige Klimaneutralität entlang der gesamten Wirkungskette. Sie erfordert jedoch Zeit und ist auf manchen Strecken wirtschaftlich nicht optimal. Demgegenüber stellen alternative, emissionsfreie Antriebe auf Basis von Batterie- und Wasserstoffbrennstoffzellentechnologie gerade für den Schienenpersonennahverkehr (SPNV) für nicht elektrifizierte Strecken eine kostengünstigere und kurzfristiger umsetzbare Option dar. Obwohl auch diese Technologien mit hohen Investitionskosten und einem bedeutenden Zeitaufwand für die Errichtung der erforderlichen Infrastruktur verbunden sind, bieten sie dennoch eine effiziente und schnellere Alternative zur vollständigen Streckenelektrifizierung. Neben der Neubeschaffung von mittlerweile marktreifen Batterie- und Wasserstoffbrennstoffzellenfahrzeugen befasst sich die DB darüber hinaus auch mit alternativen Kraftstoffen. Diese können, wie HVO, sofort eingesetzt werden oder schließen technische Lücken zum CO₂-freien Betrieb von Schwerlastverkehren auf der Schiene. In dem folgenden Beitrag wird auf spezifische Initiativen und Technologien im Bereich alternativer Kraftstoffe eingegangen, die dazu beitragen sollen, den Ausstieg aus dem Dieselbetrieb bei der Deutschen Bahn bis zum Jahr 2040 zu ermöglichen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Einsatz von HVO, Wasserstoffund Ammoniak-basierten Antrieben.

2. HVO als CO₂-reduzierende Brückentechnologie

Im Rahmen ihrer Bestrebungen, eine noch umweltfreundlichere Mobilität zu realisieren, hat die DB den Einsatz des Biokraftstoffs HVO (Hydriertes Pflanzenöl) als einen zentralen Baustein ihrer Strategie zur Dekarbonisierung von Schienenfahrzeugen etabliert. Der Einsatz von HVO als Klimaschutzsofortmaßnahme, der ausschließlich aus biologischen Rest- und Abfallstoffen hergestellt wird, ermöglicht der DB eine signifikante Reduktion der CO₂-Emissionen um rund 90 Prozent in der Gesamtbilanz und unterstützt die klimafreundliche Weiternutzung von Diesel-Bestandsfahrzeugen, ohne dass technische Umrüstungen erforderlich sind.

Seit 2019 intensiv getestet, markierte der Juli 2022 einen Meilenstein, als HVO erstmals im regulären Schienenverkehr beim Sylt Shuttle eingesetzt wurde. Im Jahr 2023 konnte die DB an 14 Schienentankstellen rund 14 Millionen Liter HVO abgeben, was zu einer Einsparung von mehr als 38.000 Tonnen CO₂ führte. Diese Entwicklung unterstreicht die Rolle von HVO als praktikable und kosteneffiziente Alternative im aktuellen Betrieb der DB, da keine zusätzlichen Investitionen für die Umrüstung der Fahrzeuge erforderlich sind und bestehende Tankstellen weiter genutzt werden können.

Die Verwendung von HVO führt zu einer signifikanten Reduktion lokaler Emissionen, darunter eine Verringerung von Kohlenstoffmonoxid, Stickoxiden, Kohlenwasserstoffen und Feinstaub. Diese positiven Auswirkungen auf die Umwelt werden ergänzt durch die Tatsache, dass HVO im Vergleich zu herkömmlichem Diesel motorenschonender ist und keine Aromaten enthält, was zu einer geringeren Verkokung der Motor-komponenten führt. Dadurch wird die Lebensdauer der Motoren verlängert, ohne dass Leistungsunterschiede festgestellt werden.

Die physikalischen Eigenschaften von HVO, insbesondere seine höhere Kältebeständigkeit und Lagerstabilität, tragen ebenfalls zur Effizienz und Praktikabilität bei. Im Vergleich zu fossilem Diesel ist HVO deutlich kälteunempfindlicher, was ein Ausflocken verhindert und den saisonalen Wechsel zwischen Sommer- und Winterdiesel überflüssig macht. Zudem verhindert seine geringere Wasseraffinität die Entstehung von Biokulturen, die zur "Dieselpest" führen können.

Die umfangreichen Tests zur Validierung von HVO bei der DB umfassten Motorprüfstandläufe, Prüfungen der Vorwärmgeräte und Emissionsmessungen. Diese Tests,



Bild 1: HVO-Erprobungsträger advanced TrainLab neben mobiler Tankstelle in Halle Ammendorf

durchgeführt unter anderem vom Karlsruher Institut für Technologie. ergaben durchweg positive Ergebnisse hinsichtlich der Verträglichkeit und Wirksamkeit von HVO. Parallel dazu wurde HVO über einen Zeitraum von 2.5 Jahren im advanced TrainLab (aTL). dem Versuchszug der DB. eingesetzt. Dabei wurden zwei der vier Verbrennunasmotoren mit HVO betrieben. Im Vergleich zum Diesel zeigten die mit HVO betriebenen Motoren keine

Störungen oder Leistungseinbußen. Darüber hinaus ergab der direkte Vergleich mit Diesel, dass sich der Einsatz von HVO aufgrund der höheren Abgastemperatur positiv auf die Standzeit der Partikelfilter auswirken kann.

Insgesamt stellt HVO das Schlüsselelement in der Strategie der DB dar, um den Übergang vom Dieselbetrieb zu CO₂-freiem Verkehr zu ermöglichen und die Förderung einer nachhaltigeren Mobilität zu unterstützen. Dies resultiert sowohl aus den umweltfreundlichen Eigenschaften von HVO als auch aus seiner praktischen Anwendbarkeit im aktuellen Betrieb.

3. Wasserstofftechnologien als Schlüssel zur CO₂-freien Mobilität bei der Deutschen Bahn

Nachdem die DB bereits bedeutende Fortschritte mit HVO erzielt hat, richtet sie nun ihren Blick auf die Implementierung von kohlenstofffreien Kraftstofftechnologien, um über die Klimaneutralität hinaus CO₂-Freiheit zu erreichen. Wasserstoff (H₂) und Ammoniak (NH₃) als kohlenstofffreie Kraftstoffe sind entscheidend für die Realisierung dieser ambitionierten Ziele.

3.1 Wasserstoffmotor: Eine robuste und flexible Alternative

Eine Alternative zur Brennstoffzellentechnologie sind Wasserstoffmotoren, die den herkömmlichen Dieselmotoren in ihrer Funktionsweise ähnlich sind, sich jedoch durch eine hohe Leistungsdichte und das Fehlen von CO₂-Emissionen bei der Verbrennung auszeichnen. Die Nutzung von Wasserstoffmotoren und Brennstoffzellen, die beide auf Wasserstoff basieren, bietet die Möglichkeit, Synergien in Bezug auf Speichersysteme und Infrastruktur zu schaffen.

Während Wasserstoffmotoren für Schienenfahrzeuge neu am Markt und noch nicht serienreif verfügbar sind, arbeiten nahezu alle Motorenhersteller intensiv an deren Entwicklung. Die technische Funktionsfähigkeit dieser Motoren wurde bereits durch langjährige Betriebseinsätze im Buslinienverkehr nachgewiesen. Studien des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der WTZ Roßlau GmbH im Auftrag der DB belegen die Vorteile von Wasserstoffmotoren in Bezug auf Robustheit, Umsetzbarkeit, Kosten

0/

und Leistungsdichte, insbesondere im Vergleich zu Brennstoffzellen. Diese Eigenschaften machen sie besonders geeignet für Umrüstungen von neueren dieselmechanischen und dieselhydraulischen Bestandsfahrzeugen auf Zero-Emission-Antriebe, da sie keine umfassende Elektrifizierung des Antriebsstrangs erfordern.

Der Einsatz von Wasserstoffmotoren stellt somit für die DB auch einen wichtigen Schritt auf dem Weg zu einem vollständig emissionsfreien Schienenverkehr dar. Sie bilden eine Brücke zu vorhandenen Technologien und können in einer Vielzahl von Anwendungsfällen eingesetzt werden, wodurch erhebliche Emissionsreduzierungen möglich sind. Zudem fördert ihr Einsatz das Wachstum der Wasserstoffinfrastruktur und stärkt die Rolle von Wasserstoff als zukunftsweisenden Energieträger im Verkehrssektor.

3.2 Ammoniak als zukunftsweisende Kraftstoffalternative für Schwerlastverkehre

Neben dem Engagement für Wasserstofftechnologien widmet sich die DB auch dem Potenzial von Ammoniak (NH₃) als kohlenstofffreiem Kraftstoff, insbesondere für den Schwerlastverkehr. Ammoniak stellt hier eine Schlüsselkomponente in der Suche nach CO₂-freien Alternativen zum Diesel dar, insbesondere da Batterien und Brennstoffzellen nicht die benötigten Energie- und Leistungsdichten für diesen Anwendungsbereich aufweisen.

Ein herausragendes Merkmal von Ammoniak ist seine höhere Energiedichte im Vergleich zu druckgespeichertem Wasserstoff. Diese Eigenschaft macht Ammoniak besonders attraktiv für den Einsatz in Schienenfahrzeugen, da es eine effiziente Speicherung und Nutzung von Energie ermöglicht. In Zusammenarbeit mit Fortescue Future Industries (FFI) und weiteren Partnern entwickelt die DB einen Ammoniak-Wasserstoffmotor, der auf der Modifikation bestehender Dieselmotoren basiert, um sie mit grünem Ammoniak und grünem Wasserstoff zu betreiben.

Der Einsatz eines Crackers, der Ammoniak in Wasserstoff und Stickstoff aufspaltet, ist ein wesentlicher Bestandteil dieses Motoransatzes. Der erzeugte Wasserstoff wird dem Ammoniak als Zündgas beigemischt, was eine CO₂-freie Verbrennung ermöglicht. Neben der Umweltfreundlichkeit bietet Ammoniak den Vorteil einer einfacheren Lagerung und Transportfähigkeit, was die Implementierung in der bestehenden Infrastruktur der DB erleichtert.



Bild 2: Schematische Darstellung Wasserstoff-Ammoniak-Motor und Projektpartner

Die Kooperation mit FFI erstreckt sich auch auf die Entwicklung grüner Lieferketten für Wasserstoff und Ammoniak, was die Herstellung, den Transport und die Verteilung dieser Energieträger umfassten. Durch diese Zusammenarbeit positioniert sich die DB nicht nur als Verbraucher, sondern auch als Innovator und Förderer der Entwicklung von grünen Energie- und Logistiklösungen.

Der Ämmoniak-Wasserstoffmotor repräsentiert einen innovativen Ansatz, um die Herausforderungen der CO₂-freien Mobilität im Schwerlastverkehr zu bewältigen. Die höhere Energiedichte von Ammoniak im Vergleich zu druckgespeichertem Wasserstoff ermöglicht es der DB, einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung von Emissionen im Schienenverkehr zu leisten und die breitere Nutzung von Ammoniak als zukunftsweisenden Energieträger voranzutreiben.

4. Fazit

Die Deutsche Bahn hat durch den Einsatz von HVO sowie die Erforschung und Entwicklung von Wasserstoff- und Ammoniaktechnologien signifikante Fortschritte in ihrer Umweltstrategie erzielt. Während HVO bereits erfolgreich für kurzfristige CO₂-Einsparungen eingesetzt wird, repräsentieren Wasserstoff- und Ammoniaktechnologien langfristige Lösungen auf dem Weg zur CO₂-freien Mobilität. Diese Initiativen demonstrieren das Bestreben der DB, innovative und nachhaltige Mobilitätslösungen zu implementieren.

5. Ausblick und nächste Schritte

- Kontinuierliche Optimierung von HVO: Die DB wird die Anwendung von HVO weiter vorantreiben und dabei die Effizienz und Umweltverträglichkeit stetig verbessern.
- Forschung und Entwicklung im Bereich Wasserstoff und Ammoniak: Die DB wird ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Bezug auf Wasserstoffund Ammoniaktechnologien fortsetzen, um zukünftige Einsatzmöglichkeiten zu evaluieren und zu optimieren.
- Projektplanung für Ammoniakmotoren: Im Jahr 2024 plant die DB, die Entwicklung eines größeren Ammoniakmotors sowie die entsprechende Abgasnachbehandlung voranzutreiben. Dies soll als Vorbereitung für eine Pilotierung auf einer DB Cargo Lokomotive ab 2025 dienen.
- Stärkung der Infrastruktur und Forschungspartnerschaften: Die DB wird die notwendige Infrastruktur für die zukünftige Nutzung von Wasserstoff und Ammoniak stärken und strategische Partnerschaften mit Industrie und Wissenschaft ausbauen.
- Förderung von Bewusstsein und Akzeptanz: Die DB wird sich weiterhin für die Sensibilisierung und Aufklärung bezüglich der Bedeutung und des Potenzials von umweltfreundlichen Technologien einsetzen.

Insgesamt steht die Deutsche Bahn vor bedeutenden Entwicklungen und Innovationen im Bereich der nachhaltigen Mobilität. Die Integration von HVO, Wasserstoff- und Ammoniaktechnologien ist ein entscheidender Schritt, um die DB als Vorreiter in der nachhaltigen Mobilität zu etablieren und ihren Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Arne Philipp Siemens

Abstract

The development and ramp-up of purely battery-powered vehicles is a top priority for Porsche. Porsche aims to deliver more than 80 percent of its new vehicles with purely electric drives in 2030 – depending on customer demand and the development of electromobility in the individual regions of the world.

Porsche sees itself as a pioneer in eFuels. This pioneering spirit has always characterized the sports car manufacturer. The eFuels out of the pilot plant are used in lighthouse events and in motorsport to demonstrate its use and make it tangible.

In terms of the greenhouse gas balance of motorised private transport, eFuels can contribute to a significant reduction in CO_2 emissions. Chile has more than 70 times more renewable energy than it requires for its own decarbonisation. Using the surplus renewable energy available there for the efficient production of eFuels enables their export as a substitute for fossil fuels to other regions of the world.

The CO_2 released during the combustion of future eFuels produced on a completely renewable basis will have been previously removed from the atmosphere during production or by being absorbed by plants. So, there are no additional greenhouse gases produced, as is the case when burning fossil fuels.

While there is increasing demand for electrified drives for new vehicles, there are still not sufficient solutions for the large global existing fleet.

Regarding our brand, we are pround that over two thirds of all Porsches ever built are still on the road. This is also a way of sustainability.

eFuels are a useful addition to electromobility. With these synthetic fuels, the CO_2 impact of the vehicle fleet can be reduced. Porsche is an innovation driver in this area and has taken this technology a decisive step forward with its fundamental work.

Together with international partners around the Chilean operating company Highly Innovative Fuels (HIF), Porsche has ensured that synthetic fuel has been produced there, using industrial processes since the end of 2022.

The focus of eFuels is more on reducing global CO_2 emissions than local emissions. Porsche uses state-of-the-art exhaust gas cleaning and hybrid technology in its vehicles with combustion engines.

In electric mode, a hybrid vehicle can drive locally emission-free and at the same time be refuelled with eFuels. By using the eFuels, the vehicle can then also make a significant contribution to reducing CO_2 emissions.

Do eFuels make the switch to electromobility unnecessary? No!

Porsche is clearly committed to electromobility and supports its ambitious ramp-up. The sports car manufacturer relies on a double E: electromobility and eFuels.

These synthetic fuels do not compete with electromobility, but rather make a valuable contribution to CO_2 reduction regardless of the switch to electromobility.

There are currently over 1.3 billion vehicles with combustion engines on the road around the world. The transition to electromobility is progressing at different speeds in different regions of the world and will take many more years across the board.

In the meantime, eFuels could be used without technical restrictions in the existing fleet (double E strategy).

eFuels are subject to the same requirements set forth in fuel standards as conventional fuels. The petrol raw material produced at the Haru Oni pilot plant is therefore currently still blended with high-quality fossil and biogenic fuel components in the next processing step. Blending with ethanol, among other things, guarantees a standard-compliant high octane number. The required properties are achieved in this manner. However, Porsche and its partners are working on using only renewable blending components in the future.

Can all Porsche vehicles be fuelled with eFuels, including high-performance GT models and classic cars of all ages?

This is Porsche's objective. In the specifications and production, Porsche and partners ensure that the fuel complies with the current DIN EN 228 standard. Basically, any car that can be operated with today's petrol station fuel can also drive with eFuels.

Classic cars can therefore also be powered with eFuels. As always, fuels that have no or low ethanol content, such as Super Plus, are required for the operation of these vehicles.

Dieter Bockey

Kurzfassung

Die Biokraftstoffpolitik in der Europäischen Union und insbesondere in Deutschland ist ein evolutionärer Prozess. Während in den 90er Jahren die Flächenstilllegungsverpflichtung Auslöser und Impulsgeber für die Entwicklung neuer Absatzmärkte, vorrangig im Biokraftstoffsektor war, bestimmten nachfolgend die Klimaschutzverpflichtungen die Ausgestaltung der förderpolitischen Rahmenbedingungen. Die zeitlich begrenzte Steuerbegünstigung und nachfolgende gesetzlich vorgegebene Beimischungsverpflichtung führte hierzulande zur Entwicklung eines zunächst weltweiten und heute in der Europäischen Union führenden Biodieselsektors, einschließlich der erforderlichen Ölmühlenindustrie. Mit dem Klimaschutzabkommen von Paris 2015 wurde der Handlungsdruck nochmals erhöht, den Energiewendeprozess im Verkehrssektor voranzutreiben. Biokraftstoffe können, gemessen am nachhaltig verfügbaren Potenzial für Anbaubiomasse sowie für Rest- und Abfallstoffe zwar einen begrenzten, aber aktuell spürbaren Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die Verfügbarkeit der Biomasse insgesamt bestimmt die förderpolitische Diskussion und den Regelungsrahmen, der mit der Umsetzung der schrittweise geänderten Erneuerbare Energien-Richtlinie an Komplexität zugenommen hat. Die gesetzlichen Anforderungen an die Nachhaltigkeit der Rohstoffproduktion über die gesamte Wertschöpfungskette, unter Beachtung der Anforderungen an die ebenfalls verschärften Schwellenwerte für die Treibhausgasminderung, sind zugleich die "Blaupause" für die Entwicklung von Zertifizierungsgrundsätzen für die stoffliche Nutzung. Deutschland geht mit der Treibhausgasquotenverpflichtung in der EU voran, technologie- und rohstoffoffen Biokraftstoffe und gleichzeitig die Elektrifizierung der Antriebe zu fördern. Treiber ist mit 600 € / t CO2 die Zahlungsverpflichtung für die quotenverpflichteten Unternehmen. Das Ergebnis ist ein auf Treibhausgas- und damit Ressourceneffizienz ausgerichteter Wettbewerb.

1. Einleitung

Die kontinuierliche bzw. sichere Verfügbarkeit von nachhaltig zertifizierter Biomasse zu wettbewerbsfähigen Rohstoffpreisen ist, neben der verlässlich und kosteneffizient funktionierenden Produktionsanlage, heute die zentrale Voraussetzung für Investitionsentscheidungen. Dies ist im Wesentlichen der Grund, warum Deutschland noch heute in der EU der wichtigste und in den 2000er Jahren global bedeutendste Biodieselproduzent ist und war. Die steuerbegünstigte Markteinführung von Biodiesel und Rapsölkraftstoff in Verbindung mit den erforderlichen Fahrzeugfreigaben machten den Weg ebenso frei für Investitionen in die Rapssaatverarbeitung von in Deutschland heute ca. 10. Mio. t Vermahlungskapazität. Treiber für die Markteinführung vor zunächst vorrangig Biodiesel aus Raps war in den neunziger Jahren die Einführung der Flächenstillegungsverpflichtung infolge nicht mehr finanzierbarer Überschüsse auf

den Getreidemärkten. In der EU mussten zu diesem Zeitpunkt etwa 5 Mio. ha stillgelegt werden, allein in Deutschland etwa 1 Mio. ha. Ethische Bedenken, dass hiermit einhergehend Produktionspotenzial für die globale Nahrungsmittelversorgung stillgelegt würde, wurden nicht geäußert. Im Gegenteil, der Exportpolitik der EU wurde vorgeworfen insbesondere den Entwicklungsländern Exporte in die EU zu verweigern und die Weltmarktpreise durch Exportsubventionen niedrig zu halten. Mitgliedstaaten wie Deutschland und Frankreich förderten als Ausweg mit Programmen die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen zur stofflichen und energetischen Nutzung [1]. In Frankreich wurde zu diesem Zeitpunkt eine Beimischungsverpflichtung eingeführt, in Deutschland verfolgten die landwirtschaftlichen Verbände - UFOP und Deutscher Bauernverband – die Strategie der Reinkraftstoffvermarktung. Biodiesel wurde damit an öffentlichen Tankstellen bundesweit sichtbar, so dass erwartungsgemäß auch Fragen nach dem Mengenpotenzial gestellt wurden. Die UFOP wies seinerzeit bereits darauf hin, dass, gemessen an der Anbaufläche, maximal ca. 5 bis 7% des Dieselkraftstoffbedarfs durch Biodiesel aus Raps ersetzt werden könnten, dieser Absatzmarkt aber zugleich ein wichtiger einkommenswirksamer Beitrag für die Landwirtschaft ist, statt Flächen unproduktiv gegen eine Prämie stillzulegen. Die von Angebotsüberschüssen geprägte Situation auf den Weltmärkten für Getreide. Pflanzenöl und Zucker führte zu analogen Entwicklungen und Fördermaßnahmen vor allem in den USA und in Brasilien; hier wurde das seit 1974 bereits bestehende Alkoholprogramm weiter ausgebaut. Grundsätzlich wurde zu diesem Zeitpunkt das Mengenpotenzial, einerseits im Hinblick auf die Bedeutung für den Flächenanspruch für den Rohstoffanbau und andererseits im Hinblick auf den Beitrag zur Reduzierung des Dieselverbrauchs und damit des Rohölbedarfs diskutiert. Hintergrund war die in dieser Zeit sich verstärkende Diskussion über den sogenannten "peak-oil" der Rohölförderung. Experten streiten sich bis heute über die Frage, wie lange die globalen Erdölreserven angesichts des global steigenden Verbrauchs reichen werden. Die heute spürbaren Auswirkungen des Klimawandels und die zunehmend genauen Vorhersagen über die Folgen der regional an Stärke zunehmenden Unwetterkatastrophen intensivierten die Diskussion und den Handlungsdruck mit dem Ziel, einen möglichst großen Anteil fossiler Ressourcen in den Lagerstätten belassen zu müssen.

Die internationale Diskussion über die Notwendigkeit für diese Einsicht begann 1991 mit dem ersten Weltklimagipfel in Rio de Janeiro. Ausgehend von dem ersten Weltklimagipfel wurden schrittweise zunehmend international verpflichtende Klimaschutzziele bzw. -vorgaben für die Treibhausgasreduzierung festgelegt, die schließlich in das völkerrechtlich und erstmals für alle Unterzeichnerstaaten verbindliche Klimaschutzabkommen von Paris mit dem Ziel einmündete, den Temperaturanstieg bis 2030 deutlich unter 2°C zu begrenzen. In diesem Umfeld nahm die Bedeutung der Nutzung erneuerbarer Energien, insbesondere der global grundsätzlich sofort verfügbaren Biomasse zu, aber im Zeitablauf zugleich auch die Kritik an dem Anbau und der Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der EU und in Drittstaaten wie Brasilien, Indonesien und Malaysia. Die Einführung gesetzlicher Bestimmungen zum Nachweis der Nachhaltigkeit des Anbaus und der Rohstoffherkunft in Bezug auf den Ressourcenschutz (Flächenumwandlung, Bodenschutz, Biodiversität usw.) bestimmen seit 2009 mit Inkrafttreten der Erneuerbare Energien-Richtlinie, RED I, (2009/28/EG) die Potenzialentwicklung der Biomasse insgesamt zur Herstellung von Biokraftstoffen, nicht nur aus Anbaubiomasse, sondern heute auch für Rest- und Abfallstoffe aus der Land- und Forstwirtschaft sowie dem Gewerbe (u.a. Abfallöle/-fette).



2. Kyoto-Protokoll und Biokraftstoffförderung in der EU

Die nach 1991 folgenden Klimaschutzkonferenzen führten schließlich zum ersten verbindlichen Abkommen, u.a. im Rahmen des sogenannten Kyoto-Protokolls, im Jahr 1997. Das Abkommen sah vor, dass die Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2008-2012 im Durchschnitt um 5.2% im Veraleich zum 1990 gesenkt werden sollen. Deutschland verpflichtete sich, in diesem Zeitraum den Treibhausgasausstoß um 21% zu senken. Dieses Protokollergebnis wurde 2012 auf der Klimakonferenz in Doha bis 2020 verlängert. Deutschland und die EU verpflichteten sich, diese Ziele zu erfüllen bzw. über zu erfüllen. Diese Klimaschutzabkommen waren damit die Treiber für erste EU-weite und nationale gesetzliche Vorgaben, um die Zielvorgaben zu erfüllen. Folglich stellte sich die "Potenzialfrage" schon sehr frühzeitig mit der Umsetzung der EU-Richtlinie zur Förderung von Biokraftstoffen im Jahr 2003 (2003/30/EG) [2]. Diese Richtlinie zielte darauf ab, mit zunächst sogenannten indikativen, d. h. national nicht verbindlichen Zielvorgaben den Anteil von Biokraftstoffen im Kraftstoffmarkt schrittweise von 2% im Jahr 2005 auf 5.75% im Jahr 2010 zu erhöhen. Gemessen am Mengenbedarf einerseits und der verfügbaren Erntemenge an Ölsaaten in der EU andererseits, wurde deutlich, dass aus europäischer Rohstoffproduktion allein die Zielvorgabe von 5,75% nicht erfüllt werden kann und folglich entweder Biodiesel oder der erforderliche Rohstoffanteil importiert werden müsste (s. Tab. Zielvorgaben der EU-Biokraftstoffrichtlinie [3]). Demgegenüber ist das Rohstoffpotenzial zur Herstellung von Bioethanol, bedingt durch Anbauflächen und Kulturarten (Getreide, Zuckerrüben), erheblich größer. Hier kann der entsprechende Mengenbedarf aus EU-Anbau grundsätzlich bedient werden. Diese Feststellung ist von Bedeutung im Zusammenhang mit der ab 2009 kritisch geführten Diskussion über indirekte Landnutzungseffekte (iLUC), aber auch der öffentlich forcierten "Tank oder Teller-Diskussion".

		Ziel 2005	Ziel 2010
Mengenziel Anteil		2 %	5,75 %
Dieselkraftstoff- verbrauch ¹⁾	(Mio. t)	158,6	165,0 ⁴⁾
Biodieselbedarf ²⁾	(Mio. t)	3,69	11,0
Flächenbedarf ³⁾	(Mio. ha)	2,63	7,88
Ottokraftstoff- verbrauch ¹⁾	(Mio. t)	124,8	113,64)
Ethanolbedarf ²⁾	(Mio. t)	3,7	9,7
Flächenbedarf ³⁾	(Mio. ha)	1,85	4,84
Gesamtfläche	(Mio. ha)	4,48	12,72

Zielvorgaben der EU-Biokraftstoffrichtlinie, bezogen auf die EU-25

¹⁾ EUROSTAT (2002)

²⁾ Basis: Heizwert Diesel: 43 MJ/kg, Heizwert Biodiesel: 37 MJ/kg, Heizwert Normalbenzin: 40 MJ/kg, Heizwert Ethanol: 27 MJ/kg

³⁾ Biodieselerträge 1,4 t/ha, Bioethanolertrag 2 t/ha

⁴⁾ Annahmen: Rückgang Verbrauch Ottokraftstoffe 9 %, Zuwachs Verbrauch Dieselkraftstoff 4 %

Treiber für die nationale Entwicklung des Biodieselmarktes und den Kapazitätsaufbau war die nationale Umsetzung der Energiesteuerrichtlinie (2003/96/EG) [4]. Diese ermächtigt die Mitgliedstaaten, Energieerzeugnisse von einer Besteuerung auszunehmen. Deutschland setzte diese Richtlinie in nationales Recht um, ohne Mengenbegrenzung, aber unter Beachtung der in dieser Richtlinie vorgegebenen Überkompensationsprüfung. Diese Vorgabe praktisch ignorierend war der deutsche Markt attraktiv für den Aufbau der nationalen Produktion, aber auch für Importe. Die Produktionskapazität stieg auf über 5 Mio. t. der Absatz (incl. Rapsölkraftstoff) im Jahr 2007 auf über 4 Mio. t (ca. 12.6% des Dieselverbrauchs). Die Überkompensationsprüfung und die hiermit einhergehende schrittweise Reduzierung der Steuerbegünstigung infolge der politisch kritisch geführten Diskussion über den Einnahmeausfall an Steuereinnahmen (1.2 Mrd. EUR wurden angeführt), führte schließlich dazu, dass hierzulande im ersten Schritt die energetische Quotenverpflichtung (Biokraftstoffguotengesetz - BioKraft-QuG vom 26. Oktober 2006) eingeführt wurde. Eine Abkehr von Biokraftstoffen kam wegen der Kyoto-Verpflichtung nicht infrage, denn die Förderung von Biokraftstoffen wurde mit diesem Abkommen politisch begründet [5] und zudem waren (und sind aktuell) Biokraftstoffe zur Erreichung der Klimaschutzziele alternativlos. Kraftstoffalternativen sind in der erforderlichen Menge für die Bestandsflotte für die Zielerfüllung kurzfristig bis 2030 nicht in Sicht.

3. Der evolutionäre Regelungsrahmen der Erneuerbare Energien-Richtlinie

Mit der für alle Mitgliedstaaten verbindlichen Festlegung nationaler Ziele für den Anteil an erneuerbaren Energien am Energieverbrauch insgesamt und gesondert für den Verkehr leitete die Erneuerbare Energien-Richtlinie (2009/28/EG) praktisch den Transformationsprozess der Energie- und Antriebswende ein. Diese Richtlinie setzte für die EU bis 2020 das Gesamtziel 20% erneuerbare Energien am Bruttoenergieverbrauch und erstmals gesondert für den Verkehrssektor die Vorgabe von 10% Anteil Energie aus erneuerbaren Quellen. Mit dieser Richtlinie wurden erstmals gesetzlich und zudem ebenfalls für Drittstaaten verbindlich wirksame Nachhaltigkeitskriterien sowie Mindestschwellenwerte als Ergebnis der Treibhausgasbilanzierung für Biokraftstoffe vorgegeben, verbunden mit der Verpflichtung, diese zu prüfen und weiterzuentwickeln. Betroffen bzw. eingeschlossen sind erstmals ebenfalls sog. Reststoffe (z. B. Stroh) und Abfälle (u.a. Gülle) sowie Abfälle im Sinne des Abfallrechts (Bioabfälle, gebrauchte Öle und Fette usw.). Zudem wurde als Datum für den Nachweis der Anbauflächenherkunft Januar 2008 festgelegt, d. h., die für die Produktion und Anrechnung angebauten Biomasserohstoffe müssen von Flächen stammen, die bereits vor Januar 2008 Ackerland oder Plantage waren. Dies war zwar grundsätzlich ein richtungsweisender Schritt zur Begrenzung des Biomassepotenzials aus Anbaukulturen zur Vermeidung von Landnutzungsänderungen, jedoch für den politischen Kompromiss zur Beschlussfassung dieser Richtlinie nicht ausreichend. Die zuvor dargestellte überschlägige Berechnung des Flächenbedarfs für die unverbindlichen Ziele (2005 - 2010) muss entsprechend deutlich nach oben korrigiert werden, unter Berücksichtigung der Tatsache, dass im Jahr 2014 die EU um weitere zehn Mitgliedstaaten erweitert wurde und zugleich die Frage der Konkurrenz zur Nahrungsmittelversorgung intensiver diskutiert wurde. Diese Richtlinie sieht daher den an die EU-Kommission gerichteten Prüfvorbehalt vor, die Auswirkungen der Zielvorgaben dieser Richtlinie auf mögliche Landnutzungsänderungen und Verlagerungseffekte, insbesondere in Drittstaaten, sowie auf die Nahrungsmittelversorgung zu prüfen. Umwelt- und karitative Verbände übten öffentlichen Druck aus, den Anbau von Biomasse für die Biokraftstoffherstellung für Anrechnungszwecke auf nationale Quotenverpflichtungen abzuschaffen bzw. zu reduzieren. Mit der sogenannten "iLUC-Richtlinie" (2015/1513) [6] wurde die zuvor intensiv diskutierte Frage der indirekten Landnutzungsänderungen politisch gelöst, weil trotz vieler Studien im Auftrag der EU-Kommission und der Umweltverbände eine vor allem juristisch vertretbare Ursache-Wirkungsbeziehung nicht nachgewiesen werden konnte. Der politische Kompromiss war schließlich die mit dieser Richtlinie verbundene Einführung einer sogenannten Kappungsgrenze für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse in Höhe von 7%, gemessen am Energieverbrauch im Straßen- und Schienenverkehr. Die Mitgliedstaaten wurden zugleich ermächtigt, diese Vorgabe bis auf 0% abzusenken, verbunden mit der Option, in gleicher Höhe national das 10%-Ziel senken zu dürfen. Die Folge ist, dass heute die Mitgliedstaaten unterschiedliche nationale Kappungsgrenzen festgelegt haben, Deutschland nach mehrfacher Absenkung schließlich auf 4,4%. Auch diese Kappungsgrenze wurde vom Bundesumweltministerium wiederholt infrage gestellt, und es wurde mehrfach initiativ mit dem Ziel, schrittweise diese Grenze auf 0% bis 2030 zu senken.

Grüne Verkehrspolitik und die Klimaschutzbrücke ...



Grünes Verkehrsparadoxon: Biokraftstoffe als existierende klimafreundliche Brückentechnologie ablehnen, während die E-Mobilität erst noch im Aufbau ist und Millionen Fahrzeuge noch Jahrzehnte auf flüssige kohlenstoffarme Kraftstoffe angewiesen sind.

UFOP e.V.

Es waren nicht nur die Biokraftstoffverbände, die sich diesen Initiativen entgegenstellten, sondern zudem das Bundesverkehrsministerium. Denn mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes und der Verschärfung der sektorspezifischen Treibhausgasminderungsvorgaben sind die jährlichen Reduktionsvorgaben nicht erfüllbar. Das BMDV setzte sich deshalb mit seinem Maßnahmenkatalog für die Beibehaltung der Biokraftstoffe als Erfüllungsoption ein und bestätigte damit die von UFOP wiederholt veröffentlichte Position, dass Biokraftstoffe insgesamt für die Zielerreichung eine wichtige Brückenfunktion einnehmen und deshalb eine Perspektive haben müssen, zumal hieran eine umfassende auch in Drittstaaten anzuwendende Gesetzgebung für den Nachweis der Nachhaltigkeit verbunden ist (vgl. die Grafik auf der vorigen Seite). Gemeint ist der absehbare Transformationsprozess, dass langfristig nachhaltig zertifizierte Anbaubiomasse sowie Rest- und Abfallstoffe für die stoffliche Nutzung benötigt werden, weil auch die chemische Industrie für die Defossilisierung auf die entsprechende Menge "grüner Moleküle" angewiesen ist. Zertifizierungsgesellschaften wie die REDcert GmbH haben zu diesem Zweck bereits entsprechende Systemgrundsätze auf Basis der Nachhaltigkeitszertifizierung für Biokraftstoffe entwickelt und bieten diese als gesonderte Zertifizierung an.

4. RED III – der EU-Rechtsrahmen bis 2030

Mit der Neufassung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) - 2018/2001/EG (Übersichtsartikel [7]) und deren Novellierung mit der Änderungsrichtlinie (RED III). 2023/2413/EG [8], wurden die aktuell geltenden Rahmenbedingungen für den weiteren Dekarbonisierungsprozess sowie die Perspektive bestimmter Rohstoffe festgelegt. Betroffen ist besonders Palmöl. Denn mit der Umsetzung der RED II wurde bestimmt, dass Biokraftstoffe aus Palmöl spätestens ab 2030 nicht mehr auf nationale Quotenverpflichtungen angerechnet werden dürfen. Mitgliedstaaten wie Frankreich, Deutschland, Österreich, Schweden u. a. haben von der Ermächtigung Gebrauch gemacht, Palmöl vorzeitig auszuschließen, Deutschland seit Januar 2023. Dies ist der Anlass bzw. Gegenstand eines von Indonesien und Malaysia bei der Welthandelsorganisation (WTO) initiierten Widerspruchsverfahrens. Rechtsgrundlage für das "phasing-out" ist die EU-Verordnung 2019/807 [9] zur Bestimmung der Ausweitung des Anbaus auf Flächen mit hohem Kohlenstoffbestand und hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen. Gegenstand der Verordnung ist die Überwachung der Anbauflächenentwicklung. Wird als Ergebnis der Evaluierung festgestellt, dass der Flächenzuwachs 10% übersteigt, wird die betreffende Kulturart aus der Förderkulisse für Biokraftstoffe ausgeschlossen. Im Falle von Sojaöl ist die vom Europäischen Parlament im Rahmen der Diskussion zur Beschlussfassung der RED III geforderte Prüfung überfällig; die EU-Kommission war beauftragt worden, bis September 2023 einen Bericht vorzulegen. Welche Bedeutung hat diese Verordnung? Infolge des vorgezogenen Ausschlusses von Palmöl in einigen Mitgliedstaaten ist der Anteil Biokraftstoffe aus Palmöl von 4,7 Mio. t im Jahr 2020 auf 3,2 Mio. t in 2023 gesunken. Insgesamt bedeutet der Ausschluss von Palmöl, dass bis 2030 ein Rohstoffbedarf von 4,7 Mio. t kompensiert werden muss, möglicherweise zusätzlich 1 Mio. t Sojaöl. Die bedeutendste Kulturart für die Produktion von Biodiesel ist in der EU der Raps mit ca. 6,4 Mio. t Rapsöl, Dies entspricht bei einem "ha-Ertrag" von ca. 1.5 t RME-Biodiesel ca. 4 Mio. ha. angebaut werden insgesamt ca. 6,2 Mio. ha. Ist Raps ein "iLUC-Rohstoff"? Aus Sicht der UFOP nicht, denn Raps wird global in bestehenden Fruchtfolgesystemen etwa alle vier Jahre

auf derselben Fläche angebaut, weil Raps nicht mit sich selbst verträglich ist, im Gegensatz zu Mais oder in gewissem Maße auch Soja [10]. Der Ausschluss wird zu Verlagerungseffekten führen, denn in Asien ist Palmöl die Grundlage für die Biokraftstoffproduktion. Indonesien beabsichtigt die Beimischungsquote von 30% auf 40% zu erhöhen, auch als Instrument zur Stützung der Palmölpreise und damit der Einkommen vor allem der sog. "smallholders". Als "Ausgleich" hat die EU-Kommission die Option für eine gesonderte Zertifizierung von sogenannten "low-iLUC-Rohstoffen" geschaffen. Palmöl könnte weiterhin für die Zweckbestimmung Biokraftstoffherstellung bzw. Anrechnung in der EU produziert werden, sofern nachgewiesen wird, dass zusätzliche Palmölmengen durch Optimierung des Anbaumanagements produziert werden, die über den durchschnittlichen Ertragsfortschritt als Ergebnis der Pflanzenzüchtung hinausgehen. Ob diese Option in der Praxis umsetzbar ist, muss bezweifelt werden, weil der Dokumentationsaufwand für den Nachweis erheblich ist und die Option dieses "Mehrertrages" auf zehn Jahre beschränkt ist.

5. RED II / III - Erweiterung der Rohstoffkulisse

Im Anhang IX der Erneuerbare Energien-Richtlinie, sind kurzgefasst, in Form einer Positivliste, die Abfall- und Reststoffe aufgeführt, die unter Teil A die Option der Doppelanrechnung auf Quotenverpflichtungen ohne Mengenbegrenzung ermöglichen. Unter Teil B sind Abfallöle und Fette aufgeführt, für die wiederum eine Kappungsgrenze von 1.7% besteht, die allerdings auf Antrag des Mitgliedstaates erhöht werden kann. Hiervon hat Deutschland Gebrauch gemacht; die Kappungsgrenze beträgt 1,9%, gemessen am Energieverbrauch im Verkehr. Diese Differenzierung ist insofern nachvollziehbar, weil die Inanspruchnahme der Doppelanrechnung unter der Bedingung steht, dass die entsprechenden Rohstoffe auf Grundlage neuer innovativer Technologien zu Biokraftstoffen verarbeitet werden. Mit der Regelung wird ein Technologie- und Investitionsanreiz geschaffen. Wie schwierig die Hochskalierung neuer Technologien ist, bestätigte leider das Projektvorhaben der Firma Clariant in Rumänien. Errichtet wurde eine Anlage zur Herstellung von Bioethanol aus Weizenstroh. Die Anlage konnte nach Fertigstellung nicht in Betrieb genommen werden, es entstand ein Gesamtverlust von ca. 220 Mio. €. Die Kappungsgrenze für Abfallöle und Fette ist nachvollziehbar, weil diese Mengen grundsätzlich sehr begrenzt verfügbar sind. Auch diese Abfallöle haben schließlich ihren Ursprung im Anbau der Rohstoffe, die global gesehen vor allem zu Palmöl ("iLUC-Rohstoff") verarbeitet werden. Im Jahr 2022 wurden global ca. 220 Mio. t Pflanzenöle produziert. Unter der Annahme, dass 5 -10% hiervon als sammelfähiges Abfallöl erfasst werden können, entspricht dies einer global verfügbaren Abfallölmenge von nur 11 - 22 Mio. t. Vor diesem Hintergrund ist zwangsläufig festzustellen, dass in Zukunft die Erweiterung der Produktion von HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) auf Pflanzenölen aus Anbaubiomasse basieren muss, dies bestätigt bereits die Entwicklung in den USA. Ein "Verlagerungseffekt" ist vorhersehbar. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Rohstoffverfügbarkeit, ob Pflanzenöle oder Abfallöle und -fette im Vergleich zu den "Rohstoffquellen" Kohlenhydrate (Getreide, Zuckerrübe, Zuckerrohr,...) und Zellulose (Reststoffe: Stroh,...) erheblich geringer ist (s. UFOP-Bericht zur "Globalen Marktversorgung") [11]. Vor diesem Hintergrund ist die aktuelle Erweiterung des Annex IX Teil A zu sehen. Mit der hier verankerten Verwendungsvorgabe "steuert" die EU-Kommission die Mengen des mit der RED III zusätzlich zu berücksichtigen Verkehrsträgers "Flugverkehr":

"Das Kriterium für die Entscheidung, ob ein Rohstoff in Anhang IX Teil A oder Teil B aufgenommen wird, besteht darin, ob er <u>nur mit fortschrittlichen Technologien oder mit</u> <u>ausgereiften Technologien</u> zu Biokraftstoffen oder Biogas verarbeitet werden kann. Da fortschrittliche und ausgereifte Technologien in der Richtlinie (EU) 2018/2001 nicht definiert sind, sollten bei der Aufnahme von Rohstoffen in Anhang IX Teil A bzw. Teil B eine Reihe von Faktoren berücksichtigt werden. Neben Indikatoren für die technische und wirtschaftliche Nutzbarkeit zählt dazu auch der Umfang, in dem die Technologien bereits eingesetzt werden."

"Zwischenfrüchte wie Zweitfrüchte und Deckpflanzen, die in Gebieten angebaut werden, in denen die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermittelpflanzen aufgrund einer kurzen Vegetationszeit auf eine Ernte beschränkt ist, sofern ihre Nutzung keine Nachfrage nach zusätzlichen Flächen verursacht und der Gehalt an organischen Bodensubstanzen erhalten bleibt und <u>soweit sie für die Herstellung von Biokraftstoffen für</u> <u>den Luftverkehrssektor verwendet werden;</u>"

Abschließend ist deshalb festzuhalten, dass die Rohstofffrage in Zukunft weiterhin die politische Diskussion über die Entwicklung der förderpolitischen Rahmenbedingungen bestimmen wird. Die RED III führt zu einer Ausweitung des Anwendungsbereiches der THG-Quotenverpflichtung durch die Einbeziehung des Flug- und Schiffsverkehrs. Für diese Verkehrsträger dürfen nur Biokraftstoffe auf die Quotenverpflichtung angerechnet werden, die aus Abfall- oder Reststoffen hergestellt wurden. Grundsätzlich unterstreicht damit die Politik die Ausrichtung auf diese Rohstoffguellen, wobei die Anbaubiomasse bestenfalls auf dem bestehenden Niveau der national vorgegebenen Kappungsgrenze fortgeführt wird. Hier bleibt abzuwarten, ob entsprechende Anpassungen erforderlich werden, weil mit der novellierten Erneuerbare Energien Richtlinie zugleich erhöhte Zielvorgaben bis 2030 verankert wurden: Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien auf 29% oder Treibhausgasminderung um 14,5%, betroffen sind alle Verkehrsträger. Damit erhöht sich die Grundgesamtheit für die Berechnung der absoluten Biokraftstoffmengen. Schätzungen zufolge wird allein für Deutschland der Mengenbedarf bis 2030 von 3,9 auf 5,3 Mio. t Biokraftstoffe insgesamt über alle Verkehrsträger steigen.

Literatur

[1] Ch. Roesch: "Monitoring "Nachwachsende Rohstoffe" Pflanzliche Öle und andere Kraftstoffe aus Pflanzen", Dritter Sachstandsbericht, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), 1997

[2] <u>https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUri</u>Serv.do?uri=OJ:L:2003:123:0042:0046:DE:PDF

[3] D. Bockey: "Biodiesel und pflanzliche Öle als Kraftstoffe – aus der Nische in den Kraftstoffmarkt", Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis Nr. 1, 15. Jg., April 2006



[4] <u>https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:283:0051:0070:DE:PDF</u>

[5] "Die Einführung von Quoten für Biokraftstoff und von E 10-Benzin in Deutschland", Wissenschaftl. Dienste Deutscher Bundestag, Aktenzeichen: WD 8 - 3000 -007/17 Abschluss der Arbeit: 20.02.2017

[6] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L1513

[7] D. Bockey: "Trilogie-Beschluss bremst Biokraftstoffe und Klimaschutz im Verkehr aus", <u>https://www.ufop.de/files/2315/4028/7085/RAPS_-Trilog-</u> Beschluss bremst Biokraftstoffe und Klimaschutz im Verkehr aus.pdf

[8] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302413

[9] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0807

[10] Prof. Dr. Rainer Kühl et al., Universität Gießen: "ENTWICKLUNG EINES MONITORINGKONZEPTES ZUR BEWERTUNG VON ILUC"

[11] UFOP-Bericht zur globalen Marktversorgung 2023/2024: <u>https://www.ufop.de/fi-les/5116/7835/4839/Web_RZ_UFOP_2076_Versorgungsbericht_A5_D_22_23_0703</u> 23.pdf

Weiterführende Informationen: <u>https://www.ufop.de/biodiesel-und-co/aktuelle-meldungen/</u>

https://www.ufop.de/biodiesel-und-co/biodiesel/biodiesel-tanken/
Verfahrensentwicklung zur Herstellung abfallbasierter Kraftstoffe

Anika Sievers, Yasin Incedag, Svenja Iserloth, Thomas Willner

Abstract

The Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg) has developed an innovative reactive distillation technique, called READi[™] process, in cooperation with the partner company Nexxoil. This process, a combination of non-catalytic thermal cracking and deoxygenation, offers the chance to convert a wide range of waste based raw materials into bio-oils. Characteristics of these bio-oils are low viscosity and low oxygen content. Due to that, they can be processed into liquid hydrocarbons as a basis for drop-in fuel production with comparatively little effort by hydrotreating.

In the current projects such a two-step approach of READi[™] process (1st step) and hydrotreating (2nd step) is applied to used cooking oil (UCO) and waste plastics. In the case of UCO as raw material, the intermediate bio-oil is called CVO (Cracked Vegetable Oil) and the final hydrotreated product is called HCVO (Hydrotreated Cracked Vegetable Oil). The HCVO is colourless clear. Its calorific value is 44 MJ/kg corresponding to an oxygen content near to zero. The HCVO yield is about 75%, based on the UCO. Appr. 80 to 90% of the HCVO is within the diesel fuel boiling range. Such a HCVO diesel fraction has a high cetane index of 70.7, a viscosity (40 °C) of 2.9 mm²/s and a density (15 °C) of 804 kg/m³. After isomerization it can be used as fuel according to standard DIN EN 15940.

Within this project a technical prototype plant with a capacity of 2 tons per week was built and operated.

1. Einleitung

Etwa 92 % des globalen Verkehrssektors basieren im Jahr 2022 noch auf flüssigen Kraftstoffen [1]. Diese flüssigen Kraftstoffe, wie Dieselkraftstoff, Benzin oder Flugkraftstoff, sind hauptsächlich reine Kohlenwasserstoffe. Hauptgründe dafür sind die sehr hohe Energiedichte (siehe Abbildung 1) sowie die einfache Handhabung, Transport und Lagerung bei Umgebungstemperatur und -druck. Ein ideales Szenario zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen wäre der Ersatz fossiler Kohlenwasserstoff-Kraftstoffe durch erneuerbare alternative Kohlenwasserstoff-Kraftstoffe in so genannter Drop-in-Qualität. In diesem Fall wären die alternativen Kraftstoffe vollständig mit herkömmlichen Kraftstoffen mischbar, so dass die bestehende Infrastruktur und die Motoren ohne Änderungen verwendet werden können. Daher werden fortschrittliche alternative Flüssigkraftstoffe in Drop-in-Qualität für eine rasche Reduzierung der Treibnausgasemissionen in der zukünftigen Mobilität an Bedeutung gewinnen [1]. Diese alternativen Kraftstoffe sollten nicht mit Lebensmitteln konkurrieren, sondern auf Abfällen und erneuerbaren Energiequellen basieren. Ein Lösungsansatz ist die Umwandlung von abfallbasierten Ressourcen in flüssige Kohlenwasserstoffe. Hierfür gibt es bereits bekannte Konzepte, die direkte katalytische Hydrierung von Ölen und Fetten zur Herstellung von sogenanntem HVO (Hydrotreated Vegetable Oil). HVO-Produkte sind bereits auf dem Markt verfügbar und können seit April 2024 auch in Deutschland als DIN EN 15490 Kraftstoffe getankt werden [2-5]. Ein weiteres etabliertes Konzept ist die Umwandlung verschiedener Ausgangsstoffe in flüssige Kohlenwasserstoffe über Synthesegas und Fischer-Tropsch-Synthese (FT). Dieses Konzept wird als XtL (Ressource X to Liquid) bezeichnet, beispielsweise GtL (Gas to Liquid), BtL (Biomass to Liquid), WtL (Waste to Liquid) und PtL (Power to Liquid). Einen Überblick über fortschrittliche alternative Drop-in-Kraftstoffkonzepte, darunter HVO, XtL und andere, gibt ein DECHEMA-Positionspapier [6].



Abbildung 1: Energiedichte in MJ/Liter verschiedener Energieträger im Transportsektor [2, 6-9] HVO = Hydrotreated Vegetable Oil, LNG = Liquefied Natural Gas, CNG = Compressed Natural Gas

Die Qualität der mit diesen Verfahren erzeugten flüssigen Kohlenwasserstoffe ist hochwertig, jedoch gibt es noch einige Herausforderungen zu bewältigen, zum Beispiel relativ hohe Produktionskosten [10-12]. In dieser Hinsicht hat HVO Vorteile gegenüber XtL: Aktuell liegt der Mehrpreis für HVO100 nach DIN EN 15940 für paraffinischen Dieselkraftstoff gegenüber dem Verkaufspreis für konventionellen Diesel an deutschen Tankstellen bei ca. 9 ct/Liter.

Bei HVO100-Diesel handelt es sich um reine paraffinische Kohlenwasserstoffe im Diesel-Siedebereich (zwischen 180 °C und 360 °C). Es gibt zwei Hauptvarianten von HVO:

- HVO, das durch direkt-katalytische Wasserstoffbehandlung des Fettrohstoffes gewonnen wird, hier "HVO" (Hydrotreated Vegetable Oil) genannt.
- HVO, bei dem durch eine nicht-katalytische thermische Vorbehandlung des Fettrohstoffes zunächst ein Zwischenprodukt erzeugt wird, hier "CVO" (Cracked Vegetable Oil) genannt, welches durch anschließende katalytische Hydrierung des CVO zum HVO aufbereitet wird. Dieses HVO wird auch als "HCVO" (Hydrotreated Cracked Vegetable Oil) bezeichnet. Dieser Verfahrensansatz gehört zu den kombinierten thermisch-katalytischen HVO-Verfahren.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. Seit über zehn Jahren wird an der HAW Hamburg (Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg) in Zusammenarbeit mit Nexxoil (Nexxoil GmbH, www.nexxoil.com) ein thermisch-katalytischen HVO-Verfahren erforscht und entwickelt, das dieses Flexibilitätspotenzial bei vergleichsweise geringen Prozesskosten bietet. Nexxoil ist ein ausgegründetes Technologieunternehmen der HAW Hamburg.

Dabei handelt es sich um das so genannte READi [™]-Verfahren (READi steht für Reactive Distillation), mit dem auf der Basis von Rest- und Abfallstoffen hochwertige Bioöle als erneuerbarer Erdölersatz hergestellt werden können. Verschiedene Einsatzstoffe wie Altspeiseöl (UCO = Used Cooking Oil) oder Kunststoffabfälle wurden bereits erfolgreich im Labormaßstab getestet.

Mit einem zweistufigen Prozessaufbau eines thermisch-katalytischen HVO-Verfahrens, bestehend aus dem READi™-Verfahren als erstem Schritt und einem anschließenden Hydrotreating-Schritt, können Drop-in-Kraftstoffprodukte hergestellt werden.

2. READi[™] Prozesskonzept und Anwendung mit UCO

Die Entwicklung des READi[™]-Verfahrens und dessen Skalierung wird seit 2018 im Rahmen von drei Teilprojekten des vom BMBF geförderten Projektes X-Energy an der HAW Hamburg fokussiert. In der ersten Phase wurden im Projekt "READi-PtL" von 2018 bis 2022 Untersuchungen zur Umwandlung von UCO in erneuerbare Kraftstoffe im Labormaßstab untersucht und eine Prototypanlage mit einer Verarbeitungskapazität von ca. 100 t/Jahr an der HAW Hamburg installiert. Parallel wurde die kontinuierliche Hydrierung im Katalysatorfestbett zur Herstellung von HCVO untersucht [13].

In der Intensivierungsphase von X-Energy erfolgte im aktuell laufenden Projekt KLIMAKRAFT zunächst eine Prozessoptimierung im Betrieb mit UCO und eine Erweiterung der Prototypanlage um eine kontinuierliche Feststoffausschleusung. Seit Dezember 2023 wird die Umrüstung der Prototypanlage aus READi-PtL zur Verarbeitung von Kunststoffabfällen vorbereitet [14]. Das Ziel ist ein chemisches Recycling zur Herstellung von Ölen als Erdölersatz. Hier wird die Eignung des thermisch-katalytischen HVO-Verfahrens zur Verarbeitung von Plastikabfällen untersucht.

Projektpartner in den Projekten READi-PtL und KLIMAKRAFT sind Nexxoil und Krebs Brüggen Sekundärrohstoffe GmbH & Co KG (KBS, www.krebs-umweltpartner.de).

Abbildung 2 zeigt das zweistufige thermisch-katalytische HVO-Verfahren zur Umwandlung von Rest- und Abfallstoffen. Bei der Verarbeitung von UCO ist der Zielkraftstoff ein erneuerbarer Drop-in-Dieselkraftstoff gemäß DIN EN 15940. Das erzeugte flüssige Kohlenwasserstoffgemisch kann aber prinzipiell auch zu erneuerbaren Drop-in-Produkten für alle anderen bekannten Kraftstoffarten, wie Benzin und Düsenkraftstoff, sowie zu erneuerbaren Kohlenwasserstoffen für die petrochemische Industrie, wie Naphtha, verarbeitet werden.

Bei der Verarbeitung von Kunststoffabfällen ist der Prozess in einem früheren Entwicklungsstadium. Die Erfahrungen in der Anwendung mit UCO werden zunächst im Labormaßstab im Betrieb mit Kunststoffen untersucht und die entstehenden Produkte werden charakterisiert.



Abbildung 2: Zweistufiges Verfahren zur Herstellung von PtL-Kraftstoffen aus Biomasse-Abfällen, z. B. UCO (UCO = Used Cooking Oil, H₂ = Hydrogen, PtL = Power to Liquid)

In der ersten Stufe, dem READi[™]-Verfahren, wird das Rohmaterial zu einem hochwertigen Bioöl mit verringerter Viskosität und verringertem Sauerstoffgehalt aufgewertet, hauptsächlich durch Cracken und Desoxygenierung. Im zweiten Schritt wird das Bioöl-Zwischenprodukt (CVO) durch Behandlung mit Druckwasserstoff zu einem reinen, nahezu sauerstofffreien flüssigen Kohlenwasserstoffprodukt veredelt. Bei dem verwendeten Wasserstoff sollte es sich um grünen Elektrolysewasserstoff handeln, in diesem Sinne handelt es sich bei dem zweistufigen Ansatz um ein PtL-Konzept (Power to Liquid), das sich im Projektakronym READi-PtL der ersten Projektphase wiederfindet. Bei dem Produkt (HCVO) handelt es sich entsprechend um ein abfallbasiertes eFuel.

Die erste Prozessstufe des thermisch-katalytischen HVO-Verfahrens, das READi[™]-Verfahren, ist in Abbildung 3 dargestellt. Es arbeitet nach dem innovativen Prinzip der Reaktivdestillation, was sich in der Prozessbezeichnung READi[™] widerspiegelt [15, 16]. Dabei wird ein höhermolekulares organisches Ausgangsmaterial in Abwesenheit von Sauerstoff in einem schwerflüchtigen flüssigen Lösungsmittel als Reaktionsmedium, der sogenannten Sumpfphase, thermisch belastet und gecrackt.

Das Lösungsmittel ist auch an den Spaltungs- und Radikalstabilisierungsreaktionen beteiligt. Es wirkt also solvolytisch mit dem Grundgedanken der Unterdrückung von Verkokungsreaktionen. Aufgrund der Verwendung eines solvolytischen Reaktionsmediums, ähnlich wie bei entsprechenden Ansätzen im Kontext der direkten Verflüssigung von lignozellulosehaltiger Biomasse, wird das Verfahren auch als Solvolyse [17-19] oder solvo-thermal processing [20] bezeichnet. Dementsprechend wird das Prinzip des READi™-Verfahrens auch als "Solvolytische Reaktivdestillation" (SRD) bezeichnet.



Abbildung 3: Erste Stufe des thermisch-katalytischen HVO-Verfahrens (READi™-Prozess) am Beispiel der UCO-Verarbeitung [15] UCO = Used Cooking Oil, CVO = Cracked Vegetable Oil, HC = Hydrocarbons

Im Reaktor des READi[™]-Verfahrens werden durch thermische Spaltreaktionen die großen Moleküle des Rohmaterials in mittel- bis kurzkettige Moleküle als Produkt umgewandelt. Die Spaltprodukte können aufgrund ihres erhöhten Dampfdrucks aus der Sumpfphase verdampfen und so den Reaktor destillativ über die Gas-Dampf-Phase verlassen.

Nach anschließender Abkühlung und teilweiser Kondensation der Gas-Dampf-Phase außerhalb des Reaktors werden ein Kondensat und eine Restgasphase gewonnen. Die Gasphase wird abgezogen und könnte später als Energiequelle zur Beheizung des Reaktors genutzt werden. Bei dem Kondensat handelt es sich hauptsächlich um eine organische Produktphase, das so genannte Bioöl (siehe Abbildung 2) als Erdölersatz-Zielprodukt des ersten Schritts, und in der Regel auch um eine geringe Menge an Wasserphase, die mit dem Bioöl nicht mischbar ist.

Durch die innovative Kombination von Reaktion und Destillation ist das Bioöl frei von unerwünschten langkettigen Schwerölmolekülen. Der Grund dafür ist, dass große Moleküle im Reaktor verbleiben, bis sie in den angestrebten Kettenlängenkorridor gecrackt werden. Sobald die Moleküle die gewünschte Kettenlänge erreicht haben, werden sie durch Destillation aus dem Reaktor entfernt. Dadurch wird verhindert, dass sie unerwünscht weiter gecrackt werden, was zu höheren Mengen an zu kleinen Molekülen, insbesondere im Gasproduktbereich, führen würde. In diesem Sinne ist der Ansatz der reaktiven Destillation ein selbstkontrollierendes Konzept zur Optimierung der Verweilzeit. Diese Effekte der Reaktivdestillation sind vorteilhaft für die Kostensenkung, da sie die Ausbeute des flüssigen Produkts im gewünschten Kettenlängenbereich maximieren und den Aufwand für die weitere Veredelung des flüssigen Produkts durch Raffination minimieren.

Der READi[™]-Prozess ist ein vollständig kontinuierlicher Ansatz. Eine besondere Herausforderung ist die Stabilisierung der Sumpfphase im kontinuierlichen Langzeitbetrieb. Um die Prozesskosten zu minimieren, sollen keine extern bereitgestellten Lösungsmittel verwendet werden, die im Prozess verbraucht werden und immer wieder zugekauft werden müssten. Die zentrale Idee des Verfahrens ist, dass die Sumpfphase kontinuierlich regeneriert wird, indem sie aus oligomeren Zwischenprodukten des Crackprozesses kontinuierlich nachgebildet wird. Vorversuche mit raffiniertem Rapsöl als Modellsubstanz für Pflanzenöl-Gemische haben gezeigt, dass sich die Sumpfphase wie vorgesehen im Laufe der Zeit zu einem stabilen Zustand entwickelt [15], mit Ausnahme der Bildung geringer Anteile fester Rückstände (Kohle). Diese Feststoffe werden kontinuierlich abgeschieden, damit sie sich nicht im Reaktor ansammeln.

Im Falle von UCO als Ausgangsmaterial wird der Sauerstoffgehalt von 11 Gew.-% im UCO auf ein niedriges Niveau von 3 bis 5 Gew.-% im Bioöl-Zwischenprodukt, hier CVO (Cracked Vegetable Oil) genannt, reduziert. Der Restsauerstoffgehalt ist hauptsächlich in organischen Säuregruppen gebunden [21].

Die signifikante Sauerstoffreduktion im ersten Schritt ohne den Einsatz von Katalysatoren oder Wasserstoff ist im Hinblick auf die Kostenreduktion vorteilhaft, da die Sauerstoffreduktion im Vorfeld den Wasserstoffbedarf für die anschließende Wasserstoffbehandlung im zweiten Schritt deutlich reduziert. Die zweite Prozessstufe ist ein katalytisches Upgrading mit dem Ziel der Herstellung reiner und ggf. verzweigter Kohlenwasserstoffprodukte. Ein besonderer wirtschaftlicher Vorteil des Verzichts auf Katalysatoren in der ersten Stufe besteht darin, dass das Verfahren sehr unempfindlich gegenüber Verunreinigungen ist und daher kostengünstige Rohstoffe geringer Qualität verarbeitet werden können.

Ein Fließschema der zweiten Prozessstufe, der katalytischen Wasserstoffbehandlung des Bioöls im kontinuierlich durchströmten katalytischen Festbett, ist in Abbildung 4 dargestellt. Dort werden typischerweise 50-100 bar Wasserstoffdruck in einem Temperaturbereich zwischen 260 und 300 °C angewendet, um den Sauerstoffgehalt auf unter 1 Gew.-% zu reduzieren. Die Reaktionen werden durch Katalysatoren in einem Rieselbett-Durchflussreaktor unterstützt. Als Katalysatoren werden metallische Verbindungen auf Al₂O₃, wie z. B. NiMo/ Al₂O₃ und CoMo/ Al₂O₃ eingesetzt. Bei der Verwendung von CVO als Bioöl wird das entstehende hydrierte Produkt als HCVO (Hydrotreated Cracked Vegetable Oil) bezeichnet.

Unveröffentlichte Versuche zur kontinuierlichen Hydrobehandlung von CVO im Labormaßstab bei 60 bar und 320 °C am Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC) der Technischen Universität Freiberg ergaben, dass der Wasserstoffbedarf der CVO-Hydrobehandlung bei 1,3 % liegt, bezogen auf den Ausgangsstoff UCO, im Gegensatz zu etwa 3 % bei der direkten einstufigen Hydrotreating von Ölen und Fetten. In der Literatur werden ähnliche Ergebnisse für den Wasserstoffbedarf der direkten Hydrotreating von Pflanzenölen angegeben, wie z.B. 2,7% für

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. Rapsöl oder 2,5% für Jatrophaöl unter idealen Laborbedingungen [22] oder 3,5% für Jatrophaöl als Annahme für reale industrielle Prozessbedingungen [3]. Der Nachweis des reduzierten Wasserstoffbedarfs bestätigt den erwarteten kostensenkenden Nutzen des zweistufigen Ansatzes dieses Projekts.



Abbildung 4: Fließschema der katalytischen Wasserstoffbehandlung [22] H₂ = Hydrogen, CVO = Cracked Vegetable Oil, HCVO = Hydrotreated Cracked Vegetable Oil, HC = Hydrocarbons

In der katalytischen Hydrierung findet eine Sättigung der Doppelbindungen im Bioöl statt. Außerdem erfolgt eine Desoxygenierung über die Reaktionspfade der Hydrodeoxygenierung unter Bildung von Wasser sowie Decarbonylierung und Decarboxylierung unter Abspaltung von CO und CO₂. Experimentelle Arbeiten an der HAW Hamburg haben HCVO-Ausbeuten von bis 95 % bezogen auf das CVO ergeben [23].

Abbildung 5 zeigt Bilder und einige Daten des Ausgangsstoffs (UCO), des Zwischenprodukts (CVO) und des Kohlenwasserstoffprodukts (HCVO) im Vergleich. Offensichtlich ist das CVO ein sauberes, transparentes Destillatprodukt aus dem schmutzigen Ausgangsstoff UCO. Während das CVO noch etwas rötlich gefärbt ist, ist das HCVO farblos und klar. Entsprechend dem abnehmenden Sauerstoffgehalt steigt der Heizwert von UCO (37 MJ/kg) über CVO (42 MJ/kg) zu HCVO (44 MJ/kg). Während die Viskosität von UCO für Standardkraftstoffe zu hoch ist, liegt die Viskosität sowohl von CVO als auch von HCVO im Zielkorridor.

Das HCVO-Produkt kann als Grundlage für die Herstellung von normgerechten Dropin-Kraftstoffen dienen. Es kann durch Rektifikation (mehrstufige Destillation), einem Standardverfahren der Erdölraffination, in eine Naphtha- und eine Dieselfraktion getrennt werden. Die Naphtha-Fraktion im Siedebereich von 80 °C bis 180 °C kann sowohl als Grundstoff für die chemische Industrie als auch über weitere Veredelungsschritte wie die Isomerisierung zur Verbesserung der Oktanzahl als Basis für die Benzinkraftstoffherstellung dienen. Die Dieselfraktion im Siedebereich von 180 °C bis

360 °C ist mit einem Anteil von etwa 80 bis 90 % der Hauptbestandteil des HCVO. Sie kann ohne weitere Modifikation als Beimischungskomponente für Dieselkraftstoff verwendet werden. Seine Cetanzahl ist erwartungsgemäß hoch, was durch einen analysierten hohen Cetanindex von 70,7 angezeigt wird. Ein solch hoher Cetanwert lässt vermuten, dass die Verbrennung der HCVO-Dieselfraktion deutlich sauberer ist als die von herkömmlichem Dieselkraftstoff. Dies konnte in Flammenvergleichstests bestätigt werden. Die bei 40 °C gemessene Viskosität der HCVO-Dieselfraktion beträgt 2,9 mm²/s und liegt damit deutlich innerhalb des Bereichs der EN 590-Norm für Dieselkraftstoff von 2,0 bis 4,5 mm²/s. Seine bei 15 °C gemessene Dichte beträgt 804 kg/m³ und liegt damit näher am Normbereich der EN 590 von 820 bis 845 kg/m³ als die Dichte von Dieselprodukten, die sowohl aus direkten einstufigen katalytisch hydrierten Ölen oder Fetten als auch aus synthetischen Kraftstoffen über Synthesegas mit Fischer-Tropsch-Synthese (FT) gewonnen werden, wie z. B. GtL (Gas to Liquid), BtL (Biomass to Liquid) oder PtL (Power to Liquid), die mit 775 bis 785 kg/m³ bzw. 770 bis 785 kg/m³ angegeben wird [2].



Abbildung 5: Rohstoff (Fettabfall, UCO), Bioöl (CVO) und PtL-Kraftstoff (HCVO) CVO = Cracked Vegetable Oil, HCVO = Hydrotreated Cracked Vegetable Oil

Die Isomerisierung dient der Verbesserung der Lager- und Kältestabilität des HVCO. In einer Parameterstudie wurde der Einfluss verschiedener Parameter zur Verbesserung der Kältestabilität des HCVO untersucht. Der Temperaturbereich liegt zwischen 240 bis 350 °C, der Druck zwischen 20 bis 80 bar und die Weight Hourly Space Velocity (WHSV, Kontaktzeit mit dem Katalysator) zwischen 0,5 bis 2 h⁻¹. Eingesetzt werden bifunktionelle Katalysatoren mit katalytisch aktiven Metall- und Säurezentren (z. B. Platin auf Zeolith Basis). Abbildung 6 zeigt beispielhaft den mit einer Katalysatorschüttung gefüllten Rohrreaktor.



Abbildung 6: Aufbau der Schüttung im kontinuierlich durchströmten Rohrreaktor an der HAW Hamburg

Isomerie bedeutet das Vorkommen von mehreren chemischen Verbindungen bei gleicher Summenformel bzw. Molekülmasse. Die einzelnen entsprechenden chemischen Verbindungen werden als Isomere bezeichnet und unterscheiden sich im räumlichen Aufbau der Moleküle. Isomerisierungsreaktionen sind thermisch neutrale und in der Regel reversible Gleichgewichtsreaktionen [24]. Das Produkt der Isomerisierungsreaktion ist die isomere Form des Edukt-Moleküls. Diese Art der intramolekularen Isomerisierung wird auch als molekulare Neuanordnung bezeichnet. Im Gegensatz zu Cracking-Prozessen, der Decarboxylierung oder der Decarbonylierung, kommt es bei einer idealen Isomerisierung zu keinem Kohlenstoffverlust in der Form nicht kondensierbarer Gase [25]. Das erzeugte Produkt entspricht HVO nach EN 15940 und kann z. B. als Drop-in Kraftstoff genutzt werden. Der zweistufige Prozess zur Herstellung von Iso-HCVO wird als thermisch-katalytisches HVO-Verfahren bezeichnet.

Für die drei hier vorgestellten Produkte CVO, HCVO und Iso-HCVO finden sich die folgenden Anwendungsmöglichkeiten:

Die in der ersten Stufe mit dem READi-Verfahren aus UCO hergestellte CVO-Dieselfraktion lässt sich als Beimischkomponente zu fossilem Diesel verwenden. Bisher nicht veröffentlichte Untersuchungen an der HAW Hamburg haben gezeigt, dass der regenerative Anteil in fossilem Diesel mit CVO auf insgesamt 40 vol% angehoben werden kann. Der in einem vorausgegangenen Projekt an der Hochschule Coburg entwickelte Diesel R33 mit einem Regenerativanteil von insgesamt 33 vol% enthält 7 vol% Biodiesel und 26 vol% HVO [26, 27]. Durch Zugabe von weiteren 7 vol% CVO kann ein EN 590-konformer Diesel R40 erzeugt werden.

Das durch katalytische Hydrierung von CVO erzeugte HCVO kann ebenfalls als Kraftstoffbeimischkomponente oder als chemischer Grundstoff eingesetzt werden. Es handelt sich um ein Gemisch aus Alkanen. Nach der Isomerisierung ist das erzeugte Iso-HCVO als Kraftstoff gem. EN 15940 einsetzbar und kann als Drop-in Kraftstoff an Tankstellen vertrieben werden.



3. READi[™] Verfahren in der Anwendung mit Kunststoffen

Neueste Studien der Plastics Europe zeigen, dass sich die Kunststoffproduktion weltweit stetig steigert. Im Jahre 2022 wurden etwa 400 Mt Kunststoff weltweit produziert, darin enthalten sind etwa 8,9% mechanisch recycelter Materialien (post-consumer) und weniger als 0,1% chemisch recycelter Materialien [28]. Life Cycle Assessments zeigen, dass das chemische Recycling den ökologischen Fußabdruck von Kunststoffen signifikant reduzieren kann und auch Anreize schaffen kann für das Sammeln und Trennen von Abfällen [29].

Das stoffliche Recycling von kunststoffhaltigen Abfällen ist, neben der Minderung der Produktion bzw. Verwendung, der einzige Weg, um THG-Emissionen durch Kunststoffe zu vermeiden und gleichzeitig die Umwelteinflüsse dieser Abfälle zu minimieren. Das heute weitläufig bekannte und industriell umgesetzte mechanische Recvcling ist in seiner Anwendbarkeit ideal für industrielle (prozessbedingte) kunststoffhaltige Abfälle, die weitestgehend chargenrein und kontaminationsarm sind. Diese sog. Pre-Consumer Abfälle werden in die Produktion zurückgeführt. bevor sie überhaupt einen Endnutzer erreichen (primäres Recycling) [30]. Einige wenige Post-Consumer Abfälle lassen sich auch durch mechanisches Recycling behandeln, die Grenzen sind jedoch erreicht, sobald stark belastete, kontaminierte und heterogene Abfälle (Siedlungsabfälle, Gelber Sack, Plastikabfälle aus Gewässern, etc.) verarbeitet werden sollen oder der Nutzen des Materials für hochanspruchsvolle Aufgaben vorgesehen ist (bspw. Lebensmittelkontakt Materialien, mechanisch stark beanspruchte Teile, etc.) [30, 31]. Hier ist das chemische Recycling eine Technologie, die neben bereits etablierten Technologien eine sinnvolle Ergänzung zur Verwirklichung einer wahren Kreislaufwirtschaft beitragen kann [29, 31].

Im Vergleich zum READi-Verfahren für Altfette sind für die Verarbeitung von Kunststoffabfällen höhere Temperaturen und höhere Drücke notwendig. Diese Prozessparameter bewegen sich im Bereich 400 – 500°C und 3 – 10 barü. Abbildung 7 zeigt beispielhaft einen Abfallstoff (Feedstock) und die daraus resultierende "light oil" Fraktion. Dieses Öl entsteht bei der Kondensation der Prozessgase bei einer Temperatur von etwa 20°C. Das thermische Cracken im READi-Verfahren erfordert keine Katalysatoren, und Feststoffe werden im Prozess durch einen Filter abgeschieden. Dies ermöglicht die Verarbeitung von hochkontaminierten Abfällen im Reaktor.



Abbildung 7: Folienschnipsel als Rohstoff für den READi-Prozess (links) und eine aus Kunststoff erzeugte Leichtölfraktion aus dem READi-Prozess (rechts) In Abbildung 8 wird der allgemeine Aufbau des READi-Verfahrens mit Kunststoffabfällen als Rohstoff dargestellt. Da es sich bei dem Rohstoff um Feststoffe handelt, ist hier eine Förderung mittels Schnecke oder auch das Aufschmelzen des Rohstoffes und Fördern mittels Extruder möglich. Unter Rühren findet das thermische Cracking der Polymere statt. Die anfangs hohe Viskosität erfordert ein verhältnismäßig hohes Drehmoment. Auch bei der Verarbeitung von Kunststoffen fallen Kohlenstoffpartikel an, daher wird der Reaktorinhalt stetig durch einen Filterkreis gefördert. Die kondensierbaren Gase werden mittels verschieden dimensionierter Kondensatoren abgeschieden.



Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung des READi™-Verfahrens zur Verarbeitung von Kunststoffabfällen

Untersuchungen mit Reinstoffen haben gezeigt, dass das READi™-Verfahren zum thermischen Cracken von Kunststoffen grundsätzlich gut geeignet ist. Abbildung 9 zeigt die Reaktionsverläufe von Polyethylen (LDPE) und Polypropylen (PP) im Laborversuch (Batch). Die gezeigten Versuche wurden in einem Autoklaven mit 250 mL Gesamtvolumen durchgeführt.

Es werden zeitweise sehr hohe Reaktionsraten bereits bei niedrigen Temperaturen (420 °C) erreicht. Der moderate Druck von hier etwa 3 barü sorgt für einen hohen Anteil einer Leichtöl-Fraktion und einer gleichzeitig hohen Produktionsrate.



Abbildung 9: Darstellung von Temperatur, Druck und Produktionsrate von Leichtölprodukten im READi-Verfahren mit reinem LDPE (links) und PP (rechts)

Höhere Drücke führen zu einer erhöhten Verweilzeit langkettiger Moleküle und ermöglichen weiteres Cracking, sowie diverse Nebenreaktionen (bspw. Diels-Alder-Reaktionen). Dies führt zu einem erhöhten Anteil nicht-kondensierbarer Gase (C1 bis C4) und einer erhöhten Feststoffbildung im Sumpf. Einen vergleichbaren Effekt haben erhöhte Temperaturen [32].

Abbildung 9 zeigt auch, dass sich neben Unterschieden in der Ausbeute auch die Reaktionskinetik der Zersetzung zwischen den Polymeren deutlich unterscheidet. Diese Unterschiede sind in der Prozessführung zu berücksichtigen und auf eine bekannte Zusammensetzung des jeweiligen Abfallstroms anzupassen.

Mit Hilfe von GCxGC Analysen kann im Rahmen einer sog. PIONA Analyse erschlossen werden, welche Moleküle und Molekülgruppen im Leichtöl vorzufinden sind. Abbildung 10 zeigt beispielhaft eine Analyse der Produkte aus dem Cracking von reinem LDPE. Insbesondere ein hoher Anteil Naphthene (46,59%) und Paraffine (43,80%) liegt hier vor. Auch Aromaten und Polyaromaten entstehen im READi-Verfahren mit Kunststoffen, jedoch mit einem deutlich niedrigeren Anteil (7,42% bzw. 2,19%). Diese Stoffe eignen sich beispielsweise als Feedstock für das Steam-Cracking, um Monomere und weitere Rohstoffe für die chemische Industrie herzustellen [33].



Abbildung 10: Beispielhafte GCxGC Analyse des Light Oil Products aus der Pyrolyse von LDPE im READi™-Verfahren

Abfallstoffe unterscheiden sich von Reinstoffen in verschiedenen Aspekten. Einerseits sind chemisch-strukturelle Unterschiede festzustellen, wie bspw. ein höherer Anteil an ungesättigten Kohlenstoff-Kohlenstoff Verbindungen, ein höherer Anteil an Heteroatomen (vornehmlich Sauerstoff und Stickstoff), sowie eine Veränderung der Molekularmassenverteilung. Diese Unterschiede können auf verschiedene Arten von Belastungen zurückgeführt werden (wiederholtes Aufschmelzen, UV-Einstrahlung, chemische Belastung, etc.) [32] und haben einen Einfluss auf Reaktionskinetik und Ausbeute im READi-Verfahren. Auch einige organische (bspw. Additive) und anorganische (bspw. metallische) Kontaminanten können Einfluss auf den Reaktionsverlauf und somit auf Produktqualität, sowie -Ausbeute haben [33].



4. Fazit und Danksagung

Die Ergebnisse aus dem Projekt READi-PtL an der HAW Hamburg in Zusammenarbeit mit den Partnerunternehmen Nexxoil und KBS bestätigen kostensenkende Effekte des untersuchten zweistufigen thermisch-katalytischen Verfahrens zur Umwandlung von Altfetten und -ölen in reine flüssige Kohlenwasserstoffprodukte, wenn man es mit dem direkten einstufigen katalytischen Hydrotreating vergleicht. Einige dieser Vorteile könnten sein:

- Da der erste Schritt, das READi™-Verfahren, keine Katalysatoren verwendet, ist das Verfahren robust gegenüber Verunreinigungen. So können billige, ungereinigte Rohstoffe minderer Qualität verarbeitet werden.
- Der Wasserstoffbedarf kann auf weniger als die Hälfte reduziert werden, oder es kann mehr als die doppelte Menge Kraftstoff mit einer bestimmten Menge an verfügbarem Wasserstoff hergestellt werden.
- Die Dichte der Dieselfraktion des Kohlenwasserstoffprodukts HCVO ist höher und liegt damit näher am Normbereich der EN 590 als die der direkten einstufigen Hydrotreating-Produkte und der XtL-Produkte über Synthesegas mit FT-Synthese. Es ist daher zu erwarten, dass es möglich sein wird, Mischungen mit höheren HCVO-Gehalten herzustellen, die innerhalb der Grenzwerte der EN 590 bleiben.

Vorversuche im Labormaßstab haben gezeigt, dass das READi™-Verfahren auch für die Umwandlung von anderen Rohstoffen wie Kunststoffabfällen eingesetzt werden kann. Im aktuell laufenden Projekt KLIMAKRAFT wird das READi™-Verfahren modifiziert und die Prototypanlage auf Basis der Ergebnisse der Untersuchungen von Kunststoffabfällen an den Laboranlagen an der HAW Hamburg umgebaut.

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung der drei Projekte im Rahmen von X-Energy. Des Weiteren danken sie Thomas Kuchling und Andrej Awgustow vom Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC) der TU Bergakademie Freiberg für die erste Untersuchung des Hydrotreatings zur Umwandlung von CVO aus dem READi[™]-Prozessschritt in ein HCVO-Produkt.

Literatur

- IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)
- [2] Aatola, H. et al. (2008): "Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine". SAE International paper 2008-01-2500...
- [3] DBFZ (2017): "Machbarkeitsanalyse für eine PTG-HEFA-Hybridraffinerie in Deutschland". Study of the DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum) on behalf of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, Leipzig.
- [4] Honkanen, M. (2019): "Neste MY Renewable Diesel[™] The sustainability story so far". Presented at the Neste Uniti Pre-Seminar in Stuttgart at 1st April 2019.

- [5] Bundesministerium f
 ür Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023), 10. BlmSchV, Zweite Verordnung zur Änderung der Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualit
 äten von Kraftund Brennstoffen, 22.11.2023
- [6] DECHEMA (2018): "Advanced alternative liquid fuels: For climate protection in the global raw materials change". DECHEMA position paper. Viewed on 27 Jan. 2020 from <u>https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2018</u> alternativeBrennstoffe_en-p-20005513.pdf
- [7] Willner, T. (2011): "Thermochemische Direktverflüssigung". ProcessNet Infotag "Alternative Brenn- und Kraftstoffe", Frankfurt/Main, 18 Oct. 2011.
- [8] Fritsche, U. R. et al. (2012): "Nach Super E10: Welche Rolle f
 ür Biokraftstoffe?" Study on behalf of Shell Deutschland Oil. Viewed on 27 Jan. 2020 from <u>http://www.iinas.org/tl_files/iinas/down-</u> loads/bio/IINAS IFEU 2012 Shell Biokraftstoffstudie.pdf.
- [9] F.M. Nizam Uddin Khan, Mohammad G. Rasul, A.S.M. Sayem, Nirmal Mandal (2023), "Maximizing energy density of lithium-ion batteries for electric vehicles: A critical review", Energy Reports, Volume 9, Supplement 11, Pages 11-21, ISSN 2352-4847,
- [10] Kasten, P.; Timpe, C. (2019): "Synthetic fuels Haw can they support climate protection efficiently?". Presented at the congress "Fuels of the Future" in Berlin at 21st January 2019.
- [11] Ziem-Milojevic, S. (2019): "Advanced bio-based and recycled carbon fuels will there be a demand, and can they deliver?". Presented at the congress "Fuels of the Future" in Berlin at 22nd January 2019.
- [12] Howes, J. (2020): "Prospects for advanced biofuels under RED II". Presented at the congress "Fuels for the Future" in Berlin at 21st January 2020.
- [13] HAW Hamburg (2018), READi-PtL, <u>https://www.haw-hamburg.de/forschung/for-schungsprojekte-detail/project/project/show/readi-ptl/</u> besucht am 23.04.2024
- [14] HAW Hamburg (2022), KLIMAKRAFT, <u>https://www.haw-hamburg.de/for-schung/forschungsprojekte-detail/project/project/show/klimakraft/</u> besucht am 23.04.2024
- [15] Augustin C. (2016): "Das Verhalten von Pflanzenölen bei der thermischen Zersetzung und der Desoxygenierung zu regenerativen Energieträgern". Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.
- [16] Augustin, C., Sievers, A., Willner, T. (2016): "Zeitverhalten der isothermen Reaktivdestillation beim thermischen Cracken und Desoxygenieren von Rapsöl". Chem.-Ing.-Tech. 88, 5, 591-599.
- [17] Isa, K. M., Abdullah, T. A. T.; Ali, U. F. M. (2018): "Hydrogen donor solvents in liquefaction of biomass: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 81, 1259-1268.
- [18] Lange, J.-P. (2018): "Lignocellulose Liquefaction to Biocrude: A Tutorial Review". ChemSusChem 11, 997-1014.
- [19] Ghosh, A.; Haverly, M. R. (2019): "Solvent Liquefaction". In "Thermochemical Processing of Biomass", Ed. R. C. Brown, Wiley, West Sussex.
- [20] IEA (2016): Newsletter from IEA Bioenergy Task 34 Direct Thermochemical Liquefaction. Issue 39, October 2016.
- [21] Sievers, A. (2013): "Hydroprocessing of Cracked Vegetable Oil". Dissertation, University of the West of Scotland.

- [22] Endisch, M.; Kuchling, T.; Roscher, J. (2013): "Process Balances of Vegetable Oil Hydrogenation and Coprocessing Investigations with Middle-Distillates". Energy Fuels 27, 2628-2636.
- [23] Baldauf E. (2016): "Katalytische Konversion von gecracktem Pflanzenöl unter Wasserstoffatmosphäre im kontinuierlichen Betrieb". Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.
- [24] J. Buddrus, Grundlagen der organischen Chemie, Berlin: De Gruyter, 2011.
- [25] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, "Weiterverarbeitung von Pflanzenölen," Energie aus Biomasse, pp. 1379-1431, 2016.
- [26] Götz, K., Fey, B., Singer, A., Krahl, J. et al., "Exhaust Gas Emissions and Engine Oil Interactions from a New Biobased Fuel Named Diesel R33," SAE Technical Paper 2016-01-2256, 2016, https://doi.org/10.4271/2016-01-2256.
- [27] Götz, K.; Zickmann, S.; Fey, B.; Bünger, J.; Krahl, J.: Diesel R33 Ein Dieselkraftstoff mit Zukunftspotenzial. Förderkreis Abgasnachbehandlungstechnologien für Dieselmotoren e. V., 13. FAD-Konferenz, S. 113-126, ISSN 2199-8973, 2015
- [28] Plastics Europe. Plastics The Fast Facts 2023. <u>https://plas-ticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/</u>, stand: 28.04.2024
- [29] Jeswani, Harish; Krüger, Christian; Russ, Manfred; Horlacher, Maike; Antony, Florian; Hann, Simon; Azapagic, Adisa (2021): Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. In: The Science of the total environment, S. 144483. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144483
- [30] Qureshi, Muhammad Saad; Oasmaa, Anja; Pihkola, Hanna; Deviatkin, Ivan; Tenhunen, Anna; Mannila, Juha et al. (2020): Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 152, S. 104804. DOI: 10.1016/j.jaap.2020.104804.
- [31] Dogu, Onur; Pelucchi, Matteo; van de Vijver, Ruben; van Steenberge, Paul H.M.; D'hooge, Dagmar R.; Cuoci, Alberto et al. (2021): The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-theart, challenges, and future directions. In: Progress in Energy and Combustion Science 84, S. 100901. DOI: 10.1016/j.pecs.2020.100901.
- [32] Abbas-Abadi, Mehrdad Seifali; Kusenberg, Marvin; Zayoud, Azd; Roosen, Martijn; Vermeire, Florence; Madanikashani, Sepehr et al. (2023a): Thermal pyrolysis of waste versus virgin polyolefin feedstocks: The role of pressure, temperature and waste composition. In: Waste management (New York, N.Y.) 165, S. 108–118. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.04.029.
- [33] Kusenberg, Marvin; Eschenbacher, Andreas; Djokic, Marko R.; Zayoud, Azd; Ragaert, Kim; Meester, Steven de; van Geem, Kevin M. (2022): Opportunities and challenges for the application of post-consumer plastic waste pyrolysis oils as steam cracker feedstocks: To decontaminate or not to decontaminate? In: Waste management (New York, N.Y.) 138, S. 83–115. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.11.009.

Lorenz Kiene, Kevin Günther

Abstract

The production of eFuels is a promising solution for achieving the goals of the Paris Climate Agreement. Despite the political focus on electromobility, studies show that eFuels can make a significant contribution to reducing CO₂ emissions in the transport sector. The Fischer-Tropsch and Methanol-to-Gasoline processes are two prominent approaches within "power-to-liquid" concepts for the production of synthetic fuels that rely on renewable energy sources such as wind and solar power. The availability of green electricity is a critical issue, whereby global locations with high energy yields and thus optimal conditions for the production of eFuels are identified. The creation of appropriate policy frameworks and the promotion of international energy partnerships are crucial to drive the industrial production of eFuels and maximize their contribution to climate neutrality.

1. Ausgangssituation

Im Rahmen der 21. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (COP21) hat sich die Staatengemeinschaft erstmals völkerrechtlich verbindlich darauf geeinigt, die Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen [1]. Um die drastischen Folgen des Klimawandels abzuwenden, wollen sich die Staaten zudem bemühen, den Temperaturanstieg sogar unter 1,5 Grad Celsius zu halten. Damit das sogenannte Übereinkommen von Paris (ÜvP) ratifiziert werden konnte, mussten mindestens 55 Staaten, die mindestens 55 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen verursachen, zustimmen. Beide Bedingungen wurden erfüllt, sodass das Übereinkommen im November 2016 formell in Kraft treten konnte. Die Bemühungen der Pariser Klimaschutzkonferenz zeigen, dass der Klimawandel eine globale Herausforderung ist und deshalb auch einer globalen Lösung bedarf.

1.1 Fahrzeugbestand 2023

Bisher lag der Fokus der deutschen Politik auf einer "All-electric-Strategie". Das 2021 ausgewiesene Ziel ist es, dass bis 2030 rund 15 Millionen Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen unterwegs sind [2]. Betrachtet man die aktuellen Zulassungszahlen des Kraftfahrt-Bundesamts (KBA), ist dieses Ziel bis Ende des Jahrzehnts allerdings kaum zu erreichen. Mit 49.098.685 Einheiten und einem Plus von 0,7 Prozent bildeten die Personenkraftwagen 2023 fortwährend die anteilsstärkste Fahrzeugklasse (80,9 Prozent). Bei den Pkw waren Benzin (61,6 Prozent) und Diesel (28,8 Prozent) die häufigsten Kraftstoffarten. Der Anstieg bei den Neuzulassungen von Pkw mit alternativem

Antrieb im Jahr 2023 spiegelte sich laut KBA auch im Bestand wider. Bei den alternativen Antriebsarten konnten zum Teil erhebliche Steigerungen bei den BEV (Battery Electric Vehicle, plus 39,1 Prozent) und Hybrid-Pkw (plus 24,5 Prozent, einschließlich der Plug-in-Hybride (plus 6,6 Prozent)) verzeichnet werden. Damit waren zum 1. Januar 2024 rund 1,4 Millionen BEV sowie rund 2,9 Millionen Hybrid-Pkw registriert [3]. Trotz der Zunahme der Elektrofahrzeuge im Fahrzeugbestand ist nicht davon auszugehen, dass in sechs Jahren die 15 Millionen-Marke erreicht wird. Zudem hat die politische Entscheidung, die staatliche Förderung für BEV ab Mitte Dezember 2023 zu streichen, der bis dahin positiven Entwicklung einen starken Dämpfer versetzt. Die Folge: Seit Jahresanfang 2024 ist die Anzahl der Neuzulassungen von BEV laut KBA deutlich rückläufig.

Insgesamt lässt sich beobachten, dass der Gesamtbestand von Pkw seit mehreren Jahren steigt. Dabei werden die Verbrennungsmotoren jedoch nicht durch vollelektrische Fahrzeuge ersetzt, sondern diese erhöhen den Bestand zusätzlich. Um die CO₂-Emissionen im Verkehr signifikant zu senken, müssen folglich Lösungen für den Fahrzeugbestand gefunden werden. Dabei muss die Zunahme von Verbrennern nicht grundsätzlich im Konflikt dazu stehen, CO₂-Emissionen im Verkehrssektor einzusparen. Schon jetzt können Dieselfahrzeuge mit HVO betrieben werden und damit den CO₂-Footprint des Fahrzeuges um circa 90 Prozent senken [4] [5]. Langfristig stehen mit eFuels, eDiesel und eBenzin, zu 100 Prozent CO₂-neutrale Kraftstoffe zur Verfügung.

1.2 Positionen aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft

In den vergangenen Wochen und sicherlich auch durch die im Juni 2024 anstehende Europawahl ist das eigentlich bereits von der Europäischen Union beschlossene Aus für Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ab 2035 wieder in den Fokus gerückt. Insbesondere die FDP [6], aber auch CDU/CSU [7] und das Bündnis Sahra Wagenknecht [8] stellen die Entscheidung zur Diskussion. Vertreter von Zulieferern wie ZF Friedrichshafen, Bosch und Mahle sehen ebenfalls eine Zukunft für Verbrenner, wenn sie mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden [9] [10] [11].

Doch was sagt die Wissenschaft? Eine Studie der Deutschen Energie-Agentur (dena) zusammen mit der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST) im Auftrag des Verbands der Automobilindustrie (VDA) hat beispielsweise den zukünftigen Energiebedarf des europäischen Verkehrssektors sowie den dafür notwendigen Bedarf für den Ausbau erneuerbarer Energieerzeugungskapazität und die damit verbundenen Investitionen untersucht, die erforderlich sind, um die Klimaschutzziele von 95 Prozent bis 2050 im Verkehr zu erreichen. In der Zusammenfassung heißt es: "Die Studienergebnisse zeigen, dass eFuels notwendig sind, um die EU-Klimaschutzziele des Verkehrssektors zu erreichen. Der Endenergiebedarf aller Verkehrsträger der EU wird im Jahr 2050 selbst in einem stark batterieelektrifizierten Verkehrsszenario zu mehr als 70 Prozent von eFuels gedeckt werden. Der größte Teil dieser eFuels wird dabei für den Flug-, Schiff- und Straßengüterverkehr benötigt." [12]

Weiterhin haben in einer umfangreichen Studienreihe Wissenschaftler im Auftrag der FVV e.V. Energieträger, also alles, was Energie speicherbar und transportabel macht (zum Beispiel Kraftstoffe, Wasserstoff, Batterien), und Energiewandler, also Maschinen, die chemisch oder elektrisch gespeicherte Energie in Bewegung umsetzen (zum Beispiel Verbrennungs- oder Elektromotoren), untersucht [13]. Dabei wurden insbe-

sondere BEV mit Brennstoffzellenfahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und eFuels verglichen. Wichtig: Die Studienautoren haben im Rahmen der Analyse den gesamten Infrastrukturbedarf und sämtliche Treibhausgasemissionen (THG) von der Erzeugung über die Nutzung bis zum Recycling in einer detaillierten Lebenszyklusanalyse (LCA) berücksichtigt.

Das überraschende Ergebnis: Alle untersuchten Lösungen bieten über diesen umfassenden Betrachtungshorizont eine vergleichbar hohe Nachhaltigkeit, wenn sie – inklusive der kompletten, nachhaltigen Energieversorgungskette – gleich schnell eingeführt werden. Nicht die Wahl klimaneutraler Antriebstechnologien an sich, sondern die Geschwindigkeit ihrer Einführung ist absolut entscheidend für die Zielerreichung eines THG-neutralen, klimafreundlichen und ressourcenschonenden Straßenverkehrs in der EU.

In der FVV-Studie wurde erstmals untersucht, wie sich nachhaltige Technologien unter günstigsten gesetzlichen Rahmenbedingungen schnellstmöglich einführen lassen. Am schnellsten lässt sich THG-neutrale Mobilität durch einen cleveren Mix verschiedener Technologiepfade erreichen. Damit ist sogar das ambitionierte deutsche Ziel umsetzbar, schon 2045 klimaneutral zu sein. Unter idealen regulatorischen Rahmenbedingungen (beschleunigte Genehmigungsverfahren, langfristig tragbare und attraktive Geschäftsmodelle) könnte das sogar bereits vor 2040 gelingen.

eFuels spielen somit in einem bestmöglichen Technologiemix zur Erreichung der Klimaziele eine entscheidende Rolle, da sie die einmalige Option bieten, die Bestandsfahrzeuge THG-neutral zu betreiben. Der Aufbau einer umfangreichen eFuel-Produktion in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren ist folglich von entscheidender Bedeutung zur Erreichung der Klimaziele. Dabei ist das Fahren mit eFuels langfristig und steuerbereinigt kostengünstiger als das Fahren eines BEV.

2. Sinnvoller Energiemix der Zukunft

Die beiden genannten Studien zeigen, dass eFuels im Energiemix der Zukunft einen signifikanten Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen leisten können. Kritiker weisen an dieser Stelle gerne darauf hin, dass in Deutschland nicht ausreichend grüner Strom zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen zur Verfügung steht. Laut statistischem Bundesamt erreicht Photovoltaikstrom in Deutschland eine Nutzungseffizienz von lediglich 10,5 Prozent. In sonnenreichen MENA-Ländern (Middle East and North Africa) wie zum Beispiel in Marokko und Algerien liegt die Nutzungseffizienz doppelt so hoch. Im Bereich der Windkraft ist der Standort Deutschland im Hinblick auf die Nutzungseffizienz ebenfalls nicht als optimal anzusehen. Gemittelt erreicht diese in Deutschland lediglich 22 Prozent. An der Nordsee liegt der Wert mit circa 30 Prozent etwas höher, in Süddeutschland mit etwa 17 Prozent etwas niedriger [14]. Dagegen erreicht ein Windrad in Patagonien eine Nutzungseffizienz von circa 75 Prozent [15]. Chile verfügt somit mit dem Faktor 70 einen signifikanten Überschuss an regenerativer Energie im Vergleich zum Eigenverbrauch [16]. Für Chile öffnet sich daher ein attraktiver Markt für Energieexporte.

Das Ziel muss es sein, eFuels dort herzustellen, wo ausreichend regenerative Energie zu entsprechend geringen Gestehungskosten (LCOE = Levelized Cost of Electricity) zur Verfügung steht. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ermittelte rein rechnerisch unter Annahme idealer Rahmenbedingungen eine 150 mal 150 Kilometer große Solarparkfläche, die ausreichen würde, um Deutschland 100 Prozent mit grünem Strom zu versorgen [17]. Auch eine weltweite Versorgung ist realistisch realisierbar, wenngleich auch technisch komplex und kostenintensiv. Andere Lösungen wie Windkraft wurden jedoch noch nicht berücksichtigt und versprechen ein hohes Optimierungspotenzial.

Welche Regionen der Welt gute Bedingungen für die Produktion von grünem Wasserstoff sowie regenerativ erzeugten synthetischen Kraft- und Brennstoffen bieten und wie groß die jeweiligen Potenziale im Detail sind, zeigt der erste globale Power-to-X-Atlas, den das Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE im Mai 2021 vorgelegt hat [18]. Die Bewertung der technischen und ökonomischen Potenziale basiert auf umfangreichen Analysen, beispielsweise der Flächenverfügbarkeit und den Wetterbedingungen. Auch Faktoren wie die lokale Wasserverfügbarkeit, den Naturschutz, die Investitionssicherheit oder die Transportkosten haben die Forscher berücksichtigt. Wesentliche Verfahrensrouten, die unter anderem den Fraunhofer-Analysen zugrundeliegen und auf die Erzeugung von flüssigen Energieträgern ausgerichtet sind – sogenannte "Power-to-Liquid"-Ansätze – werden in den folgenden Kapiteln erörtert.

2.1 Fischer-Tropsch-Verfahren (FT)

Eine der prägendsten Verfahrensrouten der "Power-to-Liquid"-Konzepte stellt die im Jahr 1925 am Kaiser-Wilhelm-Institut für Kohleforschung in Mühlheim entwickelte Fischer-Tropsch-Synthese dar. Sie ermöglicht die Herstellung von flüssigen Energieträgern wie eBenzin, eDiesel, eHeizöl und eKerosin auf Basis von Synthesegas (hauptsächlich Gemisch aus CO und H₂). Das Synthesegas kann über die Nutzung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid aus der CO₂-Konvertierung per Reverse-Watergas-Shift-Reaktion (RWGS) bereitgestellt werden. Der zusätzliche Umwandlungsschritt (gemeint ist die RWGS-Prozesstufe) stellt dabei einen apparativen Mehraufwand sowie einen zusätzlichen Wasserstoffverbraucher dar. Als CO₂-Quellen wird auf industrielle Punktquellen (hohe CO₂-Konzentration) sowie die direkte Abscheidung aus der Umgebungsluft (niedrige CO₂-Konzentration) via "Direct Air Capture"-Verfahren zurückgegriffen. Somit eignet sich die Fischer-Tropsch-Prozessroute durchaus für die Implementierung einer Kraftstoffproduktion an sonnen- und windreichen globalen Gunststandorten.

Der eigentliche Synthesevorgang erfolgt unter erhöhten Druck- und Temperaturbedinaungen und mithilfe von Metallkatalvsatoren (bspw. Eisen und Kobalt). Die Synthesegaskomponenten H₂ und CO werden unter Ablauf unterschiedlicher Reaktionspfade in diverse Stoffgruppen umgesetzt, wobei grundsätzlich eine Hydrierung von CO durch den frei verfügbaren Wasserstoff stattfindet. Dies führt zur Bildung von Kohlenwasserstoffketten diverser struktureller Ausprägung unter Abspaltung von Wasser (H₂O). Das breit gefächerte Produktspektrum an Kohlenwasserstoffverbindungen erstreckt sich bis hin zu C₃₅-Molekülen und folgt der Anderson-Schulz-Flory-Verteilung. Bevorzugt werden nicht-isomerisierte Paraffine (Alkane) und geringe Anteile aromatischer Verbindungen gebildet. Auch Alkene sowie sauerstoffhaltige Verbindungen wie Carbonsäuren und Alkohole sind möglich. Je nach gewählten Prozessparametern (Temperatur, Druckniveau, Verweilzeit, Synthesegaskomposition, Katalysator) besteht die Möglichkeit, die Selektivität hinsichtlich einer Produktfraktion gezielt zu beeinflussen. Das Kohlenwasserstoffgemisch wird vielmals als "Syncrude" bezeichnet und muss in nachgelagerten Prozessstufen zu finalen Kraftstoffprodukten und Wachsen (hochmolekulare Kohlenwasserstoffe) aufbereitet werden, um normkonforme Produkteigenschaften zu gewährleisten. Das dabei hauptsächlich zum Einsatz kommende Hydrocracken stellt einen bewährten Konversionsprozess dar, der die Kohlenwasserstoffe einer Wasserstoffatmosphäre unter hohen Drücken aussetzt. In der Folge kommt es zu selektiven Crackvorgängen, die von Isomerisierungsreaktionen begleitet werden und das Produktspektrum modifizieren [19].

Zu den Pionieren auf dem Gebiet dezentraler Power-to-Liquid-Anwendungen gehört das 2016 gegründete Unternehmen Ineratec. Der offizielle Spatenstich für die erste großindustrielle Anlage in Frankfurt Höchst erfolgte im April 2023. Die Anlage soll jährlich bis zu 2.500 Tonnen nachhaltige eFuel-Produkte bereitstellen. Dafür bietet der Industriepark Höchst aufgrund der bestehenden Infrastruktur und der benachbarten Biogasanlage als biogene CO₂-Punktquelle, die Infraserv Höchst am Standort betreibt, optimale Produktionsbedingungen. [20]

2.2 Methanol-to-Gasoline (MtG)

Ebenso wie beim FT-Verfahren bietet der methanolbasierte Benzinsynthesepfad die Möglichkeit, die in wind- und sonnenreichen Regionen der Welt generierte Elektroenergie in Form eines flüssigen Energieträgers zu speichern und transportfähig zu machen. Für den internationalen Transport aus den Gunststandorten eignet sich bereits das Vorprodukt Methanol, dessen sicheres und unkritisches Handling seit Jahrzehnten prozessiert wird und wofür bereits existierende Infrastrukturen sowie Transportkapazitäten und -wege bestehen. Methanol wird hierfür aus CO₂ und regenerativ erzeugtem Wasserstoff (per Wasserelektrolyse gewonnen) synthetisiert, wodurch sich eine Direktnutzung von CO₂ ergibt (Verzicht auf RWGS als zusätzlichen Zwischenschritt). Auf diese Weise kann das eMethanol als nachhaltiger Rohstoff nach Deutschland beziehungsweise Zentraleuropa importiert werden und prägt somit die Importstrategie für grünen Wasserstoff.

Am Standort der Bedarfszentren (zum Beispiel Deutschland) erfolgt der finale Konversionsschritt (Benzinsynthese) zur Herstellung von synthetischem Benzin über sogenannte Methanol-to-Gasoline-Verfahren. Ursprünglich in den 1970er Jahren vom Unternehmen Mobil entwickelt, kann der Prozess grundsätzlich im Festbett- oder Fluidbett-Verfahren durchgeführt werden. Als wesentliche Reaktionsschritte können die Dehydratisierung des Methanols zu Dimethylether (unter Abspaltung von Wasser) sowie die nachfolgende Umsetzung des Dimethylethers zu einem Kohlenwasserstoffgemisch mit der Hauptfraktion Benzin betrachtet werden. Die Gesamtreaktion weist eine exotherme Wärmetönung auf, womit die Notwendigkeit der Abfuhr der Reaktionswärme einhergeht, um die Produkteigenschaft konstant zu halten. Bei den eingesetzten Katalysatormaterialien handelt es sich zumeist um Zeolith-Katalysatoren (bspw. ZSM-5), die im Laufe des Prozesses verkoken. Daher müssen Regenerationsphasen vorgesehen werden, wobei die Koksrückstände durch Abbrennen entfernt werden. Beim Wirbelschichtverfahren wiederum fallen Methanoldehydratisierung und Dimethyletherumsetzung zeitlich und räumlich übereinander. In diesem Anwendungsfall wird der Katalysator kontinuierlich ausgeschleust und regeneriert. Unabhängig vom jeweiligen Verfahren umfasst das Spektrum an Kohlenwasserstoffen Verbindungen bis zu C10-Aromaten. Die genauen Kompositionen sind wiederum abhängig vom gewählten Verfahren [21].

ExxonMobil vermarktet seinen heutigen MtG-Prozess ausschließlich als Fluidbettvariante (früher: zweistufiges Festbettverfahren), wohingegen die TIGAS-Technologie von Haldor Topsoe auf Festbettreaktoren (adiabatisch) basiert. Als drittes marktführendes

Unternehmen im Bereich der MtG-Verfahren bietet die in Chemnitz ansässige CAC Engineering GmbH ein eigenentwickeltes Festbettverfahren an, welches sich von den erstgenannten unterscheidet. Das eMethanol wird zunächst erhitzt, um es in den dampfförmigen Zustand zu überführen. Am Kopf des Festbettreaktors eingeleitet, durchströmt es die mit festem Katalysatormaterial gefüllten Reaktionsrohre von oben nach unten. Unter den vorherrschenden milden Reaktionsbedingungen (Temperatur 300 bis 400 Grad Celsius, Druck < 10 bar,) und dem isothermen Betrieb erfolgt die Umsetzung in ein Kohlenwasserstoffgemisch. Dieser Vorgang erfolgt in einer einzigen Prozessstufe, wodurch das Ausschleusen von Zwischenprodukten entfällt und der Aufwand an Reaktorausrüstung erheblich reduziert wird. Das entstehende Wasser wird nachfolgend zum Benzinreaktor abgetrennt und das Kohlenwasserstoffgemisch in einer konventionellen, zweistufigen Destillationseinheit ins Hauptprodukt Benzin sowie die Nebenprodukte Heizgas, LPG und Schwerbenzin fraktioniert. Das so gewonnene synthetische Benzin weist standardkonforme Eigenschaften (DIN EN 228) und eine hohe Oktanzahl im Bereich ROZ 92-93 auf. Durch Zugabe von Ethanol wird nach DIN EN 228 festgesetzte Mindestwert für die Oktanzahl ROZ von 95 überschritten, sodass die Produkteigenschaften vollumfänglich der genannten europäischen Norm für Ottokraftstoffe entsprechen [22].

Als konkrete projektseitige Anwendungsbeispiele für MtG-Prozesse sind die sich in Betrieb befindende Produktionsanlage Haru Oni in Patagonien (Chile) [23] sowie die aktuell weit fortgeschritten projektierte kommerzielle Produktionsanlage German eFuel One in Steyerberg (Deutschland) zu nennen.

2.3 Mehrzonen-Plasmaverfahren

Mit einem neuartigen Multistage-Plasmareaktor offeriert das Unternehmen Caphenia die Möglichkeit zur Synthesegasherstellung unter direkter Einbindung von CO₂ und (Bio-)Methan. Das so erzeugte Synthesegas dient als Zwischenprodukt auf dem Weg zur finalen Kraftstoffbereitstellung. In der ersten Reaktorzone (= Plasmazone) wird in einem Hochtemperaturplasma bei ca. 2.000 Grad Celsius Methan in die Bestandteile Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H₂) zerlegt. In der zweiten Prozesszone (= Boudouard-Zone) erfolgt die thermochemische Konversion des Kohlenstoffs unter Zufuhr von Kohlenstoffdioxid (CO₂) zu Kohlenstoffmonoxid (CO) – die sogenannte Boudouard-Reaktion mit endothermer Wärmetönung. Die dritte Prozesszone (= Wassergas-Shift-Zone) umfasst die Konversion des verbleibenden Kohlenstoffs mit Wasserdampf (H₂O) zu Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂). Auf diese Weise kann die Zusammensetzung des Synthesegases (H₂/CO-Verhältnis) kontrolliert und auf die nachgeschaltete Syntheseroute angepasst werden. Die technische Realisierung erfolgt aktuell durch die Fertigung einer Pilotanlage für den Chemiestandort Frankfurt/Höchst [24].

3. Fazit

eFuels können einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens leisten. Um den industriellen Hochlauf zu ermöglichen, muss die Politik jedoch endlich die richtigen Rahmenbedingungen schaffen. Dazu gehört die Anrechenbarkeit von eFuels bei der EU-Flottenregulierung von Pkw und schweren Nutzfahrzeugen. Zudem sollte eine Mindestmengenquote für eFuels in allen Verkehrssektoren eingeführt werden. Außereuropäische Energieprojekte in Form von Energiepartnerschaften mit Ländern, in denen die Bedingungen für regenerative Energie optimal sind, sowie der Abbau von Handelshemmnissen bei Energieimporten erleichtern die Produktion sowie den Import von eFuels und garantieren darüber hinaus nicht nur Versorgungssicherheit, sondern auch einen Preis, der für den Verbraucher am Ende bezahlbar ist.

Literatur

- [1] Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations, 2015
- [2] Nachhaltige Mobilität Nicht weniger fortbewegen, sondern anders. Pressebeitrag vom 23.12.2022, Bundesregierung, Berlin, 2022
- Jahresbilanz 2024 Zahlen, Daten, Fakten: Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2024 gegenüber dem 1. Januar 2023. Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, 2024
- [4] Stellungnahme zum Referentenentwurf Änderung der Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen (10. BlmSchV) vom 06.07.2023. UNITI, Berlin, 2023
- [5] HVO und Co: Kraftstoff-Mythen. Pressebeitrag vom 27.01.2024, Sprit Plus Magazin, 2024
- [6] Wahlprogramm der FDP zur Europawahl 2024: https://www.fdp.de/sites/default/files/2024-01/fdp_europawahlprogramm-2024_vorabversion.pdf
- [7] Wahlprogramm der CDU/CSU zur Europawahl 2024: <u>https://assets.ctfas-sets.net/nwwnl7i-fahow/476rnHcYPkmyuONPvSTKO2/972e88ceb862ac4d4905d98441555e0c/europawahlprogramm-cdu-csu-2024_0.pdf</u>
- [8] Wahlprogramm vom Bündnis Sahra Wagenknecht zur Europawahl 2024: <u>https://bsw-vg.de/wp-content/uplo-</u> ads/2024/02/BSW Europawahlprogramm 2024.pdf
- [9] ZF für E-Fuels: Lösung für den Bestand. Pressebeitrag vom 23.03.2023, autoservicepraxis.de, 2023
- [10] eFuels: CO2-Minderungspotenziale für bestehende Antriebssysteme. Veröffentlichung Robert Bosch GmbH
- [11] Mahle gibt dem Verbrenner ein langes Leben. Pressebeitrag vom 07.09.2023. Tagesspiegel Background, 2023
- [12] Das Potenzial strombasierter Kraftstoffe für einen emissionsarmen Transportsektor in der EU, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) und Ludwig-Bölkow-Systemtechnik im Auftrag des Verbands der Automobilindustrie (VDA), 2017
- [13] Zukünftige Kraftstoffe: FVV-Kraftstoffstudie IVb Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter, Frontier Economics im Auftrag von FVV e.V. // Science for a moving society, 2022

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



- [14] Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2021
- [15] Wasserstoffprojekte in Chiles Süden nehmen Gestalt an. Pressebeitrag vom 05.08.2022, GTAI - Germany Trade & Invest, Berlin, 2024
- [16] "Wir können 70-mal mehr Strom erzeugen, als wir selbst verbrauchen". Pressebeitrag vom 08.07.2021, WELT, Berlin, 2021
- [17] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
- [18] Global PtX Atlas, Fraunhofer IEE
- [19] Hannah Kirsch et al.: CO₂-neutrale Fischer-Tropsch-Kraftstoffe aus dezentralen modularen Anlagen: Status und Perspektiven. Chemie Ingenieur Technik, 2019, 92 (1-2), S. 91-99
- [20] Spatenstich f
 ür E-Fuel Produktionsanlage in Frankfurt am Main. Pressebeitrag vom 19.04.2023, INERATEC GmbH, Karlsruhe, 2024
- [21] René Stahlschmidt: Technisch-wirtschaftliche Bewertung von Prozessketten zur Synthese von Otto-Kraftstoff. Dissertation, Freiberg, 2017
- [22] CAC Synfuel, CAC Engineering GmbH, Chemnitz
- [23] Haru Oni Demonstrationsanlage, HIF Global, Chile
- [24] CAPHENIA GmbH, Bernau am Chiemsee



Kraftstoffstrategie für kritische Infrastruktur

Sascha Micklich, Andreas Kurtz, Michael Faulde

Abstract

A continuously functioning and efficient transport and traffic system is a prerequisite for modern economies based on the division of labour that rely on the mobility of goods and people.

Although the state itself does not have to operate any vital infrastructure, it does have a responsibility to the public to guarantee it. This means that it must enable all citizens to access these services. The responsibility to guarantee can be derived from the right to life and physical integrity (Art. 2 para. 2 sentence 1 GG) and the principle of the welfare state (Art. 20 GG).

Water, electricity, food and local public transport are everyday things that are essential to life. In Germany, these and other essential goods and services are supplied by so-called critical infrastructures. These include, for example, energy and water supply, transport, but also medical care.

The importance of critical infrastructures is only recognised when disruptions occur.

Ensuring the protection of critical infrastructures is a core task of state and corporate security provision. The aim is to contribute to the best possible protection of critical infrastructures and thus ensure the supply of the population and internal security.

The Federal Ministry of the Interior, Building and Community (BMI) and the Federal Ministry of Defence (BMVg) jointly signed a position paper on the use of synthetic fuels, so-called eFuels, on 24 March 2021. The aim of both ministries is to promote the development of eFuels and use them for their own vehicle fleets as soon as possible.

Future energy requirements for vehicles of the German Armed Forces, the Federal Agency for Technical Relief and the Federal Police as well as other authorities and organisations with security tasks are to be covered as sustainably as possible. The high proportion of specialised vehicles requires far-reaching considerations regarding the use of climate-neutral fuels.

After careful examination and consideration, eFuels could also replace fossil fuels currently used in special-purpose vehicles. Existing vehicles could continue to be used and supply could be made possible via the existing refuelling station network. eFuels are climate-neutral, provided they are produced from renewable energy. The specialpurpose vehicles of the German Armed Forces, the Federal Agency for Technical Relief and the Federal Police can be reliably fuelled with eFuels in a fail-safe and highperformance manner. This also applies to ships and helicopters.

Robust emergency planning for fuel supply is very important.

The fuel strategy for critical infrastructure continues to be based on fossil fuels such as petrol, diesel, light heating oil and jet fuel (JET A-1).

Alternative fuels for supply in the event of a crisis are not foreseeably available to the extent required. Emergency vehicles with combustion engines are still necessary to ensure internal security. To this end, the existing legal regulations are still relevant in the event of supply disruptions.

The Petroleum Stockpiling Association (EBV) has the statutory duty to maintain constant stocks of crude oil and petroleum products in the event of supply disruptions. The

 $\langle \rangle$

statutory stockpiling obligation is based on the average quantity of crude oil and petroleum products imported into the Federal Republic of Germany in 90 days.

For a possible supply in the event of a crisis, BAFA records the consumers in accordance with Section 12 (1) sentence 2 ErdölBevG and maintains a database for this purpose.

BALM is to provide the necessary logistics in accordance with the Transport Services Act.

The stocks are to be distributed across the territory of the Federal Republic of Germany so that in each of five defined supply regions there are at least immediately accessible stocks with a range of 15 days.

The government assumes that operators of critical infrastructures can maintain a backup power supply for 72 hours without refuelling, as recommended by the federal government (BBK). After 72 hours at the latest, the fuel is required for refuelling emergency power generators on site. Fuel distribution measures must therefore start much earlier, possibly as soon as the power outage occurs. In addition, the situation on site during a crisis is often different from what is generally assumed.

The Federal Police has 12 of its own petrol stations, mobile refuelling facilities and tanker vehicles, which are intended to ensure mobility and power supply via emergency power generators in the event of a crisis. These will continue to be maintained and gradually expanded within the scope of available budget funds.

1. Kraftstoffstrategie für kritische Infrastruktur

Voraussetzung für moderne arbeitsteilige Volkswirtschaften, die auf die Mobilität von Gütern und Personen angewiesen sind, ist ein durchgehend funktionsfähiges und leistungsstarkes Transport- und Verkehrssystem.

In Deutschland gewährleisten 830.000 km Straßen, 38.600 km Schienen, 7.300 km Binnenwasserstraßen und 24 Hauptverkehrsflughäfen den Warentransport und die Mobilität der Bürgerinnen und Bürger. Zugleich sind sie Voraussetzung für die reibungslose Versorgung von Menschen und Unternehmen mit Lebensmitteln, Gütern und Rohstoffen.

Zwar muss der Staat selbst keine lebensnotwendigen Infrastrukturen betreiben, er hat aber gegenüber dem Bürger eine Gewährleistungsverantwortung. Das heißt, er muss es allen Bürgerinnen und Bürgern ermöglichen, diese Leistungen zu beziehen. Die Gewährleistungsverantwortung lässt sich ableiten aus dem Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit (Art. 2 Abs. 2 Satz 1 GG) und dem Sozialstaatsprinzip (Art. 20 GG).

Wasser, Strom, Lebensmittel oder der öffentliche Nahverkehr sind alltägliche Dinge. die jedoch lebensnotwendig sind. Die Versorgung mit diesen und weiteren unentbehrlichen Gütern und Dienstleistungen übernehmen in Deutschland sogenannte Kritische Infrastrukturen. Dazu gehören beispielsweise die Energie- und Wasserversorgung, der Verkehr, aber auch die medizinische Versorgung. Wie bedeutsam Kritische Infrastrukturen sind, erkennt man erst, wenn es zu Störungen kommt.

Die Gewährleistung des Schutzes Kritischer Infrastrukturen ist eine Kernaufgabe staatlicher und unternehmerischer Sicherheitsvorsorge. Ziel ist es, zum bestmöglichen

Schutz Kritischer Infrastrukturen beizutragen und somit die Versorgung der Bevölkerung und die Innere Sicherheit sicherzustellen.

Aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten von informationstechnischen Anwendungen und der Verfügbarkeit von Daten spielen im Sektor Transport und Verkehr nicht nur Hardware- und Software-Probleme, sondern zunehmend Cyberangriffe eine Rolle. Extremwetterereignisse verursachen massive Zerstörungen an Verkehrsinfrastrukturen – siehe Ahrtal. Die durch den Klimawandel an Häufigkeit und Intensität zunehmenden Starkregenereignisse, Überschwemmungen, Hangrutschungen und Waldbrände haben bereits in den vergangenen Jahren zunehmend große Schäden an Straßen, Brücken und Schieneninfrastrukturen in Deutschland verursacht.

Das Gesetz zur Sicherung von Verkehrsleistungen (Verkehrsleistungsgesetz - VerkLG) gewährleistet die Versorgung mit ausreichenden Verkehrsleistungen u.a. im Falle von Naturkatastrophen, schweren Unglücksfällen und wirtschaftlichen Krisenlagen.

Die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Gesetz zur Sicherung von Verkehrsleistungen (VerkLGVwV) regelt die Vorbereitungen und die Durchführung zur Sicherung von Verkehrsleistungen bei der Personen- und Güterbeförderung. Darüber hinaus beschreibt die Verwaltungsvorschrift das Verfahren, wie die beteiligten Behörden während des Vollzugs des Verkehrsleistungsgesetzes miteinander zusammenwirken. Das Gemeinsame Melde- und Lagezentrum von Bund und Ländern (GMLZ) im BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe) nimmt dabei als anforderungsberechtigte Behörde den Leistungsbedarf der obersten Katastrophenschutzbehörden der Länder sowie den Leistungsbedarf der im Katastrophenschutz auf Landesebene mitwirkenden Hilfsorganisationen entgegen und leitet die Bedarfe an das Bundesamt für Logistik und Mobilität (BALM) weiter. Hierfür stehen, als Bestandteil der Verwaltungsvorschrift, Anforderungsformulare zur Verfügung.

Um sicherzustellen, dass für Zwecke der Verteidigung erforderliche lebenswichtige Verkehrsleistungen insbesondere zur Versorgung der Zivilbevölkerung und der Streitkräfte zur Verfügung stehen, regelt das Gesetz zur Sicherstellung des Verkehrs (Verkehrssicherstellungsgesetz - VerkSiG) die Erstellung von entsprechenden Rechtsverordnungen.

In der Verordnung über Zuständigkeiten nach dem Verkehrssicherstellungsgesetz (Verkehrssicherstellungsgesetz-Zuständigkeitsverordnung - VSGZustV) werden Behörden verpflichtet, Leistungen nach dem VerkSiG bereitzustellen.

Die Energieversorgung ist ein wichtiger Sektor Kritischer Infrastrukturen. Sie umfasst die Branchen Elektrizität, Gas, Mineralöl und Fernwärme.

Einsatzfahrzeuge und Notstromaggregate wichtiger Einrichtungen in den Kreisen und Kommunen, sowohl der Gefahrenabwehr als auch Kritischer Infrastrukturen, benötigen im Ereignisfall eine kontinuierliche Zufuhr von Treibstoff. Mit dieser Zufuhr steht und fällt der Erfolg der Gefahrenabwehr und der Notversorgung der Bevölkerung.

Am Beispiel des gemeinsamen Positionspapiers von Bundesinnenministerium und Bundesverteidigungsministerium stellen wir Ihnen im Folgenden die Kraftstoffstrategie mit der Ausrichtung auf eine klimaneutrale Mobilität mit alternativen Kraftstoffen für die Zukunft vor.

2. Gemeinsames Positionspapier von Bundesinnenministerium und Bundesverteidigungsministerium: Sonderfahrzeuge sollen künftig mit alternativem Kraftstoff betrieben werden

Gemeinsam haben das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) und das Bundesverteidigungsministerium (BMVg) ein Positionspapier zur Nutzung von synthetischen Kraftstoffen, sogenannten eFuels, am 24. März 2021 gezeichnet. Ziel beider Ministerien ist es, die Entwicklung von eFuels zu fördern und sie so bald wie möglich für die eigenen Fuhrparks zu nutzen.

Zukünftige Energiebedarfe von Kraftfahrzeugen der Bundeswehr, des Technischen Hilfswerks und der Bundespolizei sollen möglichst nachhaltig gedeckt werden. Der hohe Anteil an Sonderfahrzeugen erfordert weitreichende Überlegungen über die Nutzung von klimaneutral hergestellten Kraftstoffen.

Nach sorgfältiger Prüfung und Abwägung könnten eFuels aktuell verwendete fossile Kraftstoffe auch bei Sonderfahrzeugen ersetzen. Bestandsfahrzeuge könnten weitergenutzt und die Versorgung über das vorhandene Tankstellennetz ermöglicht werden. eFuels sind klimaneutral, sofern sie aus regenerativer Energie hergestellt werden. Die Sonderfahrzeuge der Bundeswehr, des Technischen Hilfswerks und der Bundespolizei können mit eFuels ausfall- und leistungssicher und zuverlässig betrieben werden. Das gilt auch für Schiffe und Hubschrauber.

In ihrem gemeinsamen Positionspapier stellen BMI und BMVg fest: Konventionelle Motoren, mit eFuels betrieben, bieten eine hohe Zuverlässigkeit und können einen sehr guten Beitrag zur Treibhausgasneutralität leisten. Bei den Sonderfahrzeugen der Bundeswehr, der Bundespolizei und des Technischen Hilfswerks soll künftig auf "Kraftstoffresilienz durch technische Flexibilität" gesetzt werden. So können Klimaschutz und Nachhaltigkeit und die Gewährleistung der Sicherheit eng verknüpft werden.

Bislang werden nachhaltig erzeugte eFuels noch nicht industriell hergestellt. Ziel beider Ministerien ist es, deren Entwicklung zu fördern und sie schnellstmöglich nutzbar zu machen.

Die Bundeswehr, die Bundespolizei und das Technische Hilfswerk benötigen zur Sicherstellung der Inneren und Äußeren Sicherheit im täglichen Einsatz, aber auch in besondere Lagen und Gefahren, verlässliche Mobilität und Energie-/Medienversorgung. Diese muss kompatibel mit dem vorhandenen und in der Beschaffung befindlichen Fuhrpark/Material möglich sein, dessen Nutzungsdauer mit bis zu 40 Jahren regelmäßig weit über der zivilen Nutzungsdauer liegt. Dies gilt insbesondere für behördliche Einsatz- bzw. Gefechtsfahrzeuge.

2.1 Notwendigkeit synthetischer Kraftstoffe für Einsatz- bzw. Gefechtsfahrzeuge

Die Einsatz- bzw. Gefechtsfahrzeuge müssen im täglichen Einsatz und auch in besonderen Lagen und Gefahren für die Innere und Äußere Sicherheit ausfallsicher und zuverlässig betrieben werden können, um Mobilität und Einsatzbereitschaft von Bundeswehr, Bundespolizei und Technischem Hilfswerk auf der Grundlage des Grundgesetzes jederzeit und ohne örtliche Beschränkung sicherzustellen.

Da diese ca. 80 % der jeweiligen Fuhrparks ausmachen, sind hier folgerichtig auch Ausnahmen hinsichtlich Nachhaltigkeitsfragen in Anspruch zu nehmen. Diese werden in den Anlagen 2 und 3 bezüglich taktisch/technischer bzw. ergänzender spezifischer Anforderungen skizziert.



2.2 Bewertung von Kraftstoffen und Antriebsformen für Einsatz- bzw. Gefechtsfahrzeuge

Die wissenschaftlichen Analysen aus dem Expertenkreis Mobile Energiesysteme der Bundeswehr, der Blick in die Zukunft sowie die Möglichkeiten der Kraftstoff- und Antriebsformen zeigen, dass synthetische Kraftstoffe vergleichbare Eigenschaften zu derzeit genutzten fossilen Kraftstoffen aufweisen und damit für vorhandene Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor genutzt werden können. Werden sie zusätzlich aus erneuerbaren Energien produziert, ist der gesamte Kreislauf von der Erzeugung bis zur Nutzung beim Betrieb der Fahrzeuge klimaneutral.

Mit der Nutzung von synthetischen Kraftstoffen werden die Bundeswehr, die Bundespolizei und das Technische Hilfswerk befähigt, ihre hoheitlichen Aufgaben kontinuierlich, ausfallsicher und zuverlässig zu erfüllen.

2.3 Taktisch/technische Anforderungen

Die Fahrzeuge (zu Land, zu Luft und auf See) sowie Geräte zur Stromerzeugung und des Energiemanagements der Bundeswehr, der Bundespolizei und des Technischen Hilfswerks müssen jederzeit im Tagesdienst aber auch in besonderen Lagen und Gefahren für die Innere und Äußere Sicherheit Deutschlands, wie bei:

- Terroranschlägen und schwerer Gewaltkriminalität,
- Entführungen und Geiselnahmen im Inland, die die Bundesregierung tangieren,
- unfriedlichen demonstrativen Aktionen größeren Ausmaßes,
- schweren IT-Sicherheitsvorfällen, insbesondere im Bereich von Trägern kritischer Infrastrukturen,
- Naturkatastrophen und besonders schweren Unglücksfällen gem. Artikel 35 GG,
- großflächigen Gefährdungslagen,
- innerstaatlichen Krisen, ohne dass der Spannungs- und Verteidigungsfall ausgerufen wurde,
- einem Notstandsfall gem. Artikel 91 Absatz 2 GG und
- dem Spannungs- und Verteidigungsfall,

ausfallsicher und zuverlässig betrieben werden können.

Für den Bereich der Mobilität bedeutet dies, dass

- der Einsatzzweck des Fahrzeuges (bspw. Schutz, Geländegängigkeit),
- die Leistungsdichte der Kraftstoffe,
- die Versorgungssicherheit und die Handhabung in besonderen Einsatzlagen,
- die Infrastruktur inklusive der Lade- und Tankzeiten,
- die Nutzlast der Fahrzeuge,
- die Robustheit des Kraftstoffes im Einsatz (bspw. gem. der NATO Single Fuel Policy - SFP),
- die Nutzungszeit der Fahrzeuge etc.

bei der Beschaffung und der Nutzung von Einsatz- bzw. Gefechtsfahrzeugen zwingend zu beachten sind.



2.4 Militärische Anforderungen an Kraftstoffe

Die Bundeswehr orientiert sich maßgeblich an den Vorgaben der NATO. Deren Energy Security Centre of Excellence hat bereits 2016 unter dem Begriff Interoperabilität auch die Fähigkeit seiner Partner zur standardisierten und robusten Querversorgung von Kraftstoffen betont. Es wurde einvernehmlich festgestellt, dass schon zeitnah eine stetig steigende Beimischung klimaneutraler, synthetischer Kraftstoffe zu den fossilen immer mehr an Bedeutung gewinnen wird. Langfristiges Ziel ist es, bei der Herstellung solcher synthetischen Kohlenwasserstoffe eine überwiegende bzw. vollständige Nutzung aus regenerativen Quellen zu ermöglichen, was sich unmittelbar positiv auf die Nachhaltigkeit und den Klimaschutz auswirken wird.

2.5 Zivil- und Katastrophenschutz -polizeiliche Anforderungen an Kraftstoffe

Die Fahrzeuge im Fuhrpark der Bundespolizei und des Technischen Hilfswerks sind im wesentlichen Einsatzfahrzeuge / Sonderfahrzeuge. Mit Blick auf die hohe Nutzungsdauer von Einsatzfahrzeugen – in der Regel zwischen 12 und 25 Jahre bei der Bundespolizei / zwischen 8 und 30 Jahre beim Technischen Hilfswerk – und dem Umstand, dass gegenwärtig keine umweltfreundlichen Alternativen für Einsatzfahrzeuge für den polizeilichen Einsatz verfügbar sind, ist die Eignung von Alternativen beim Antrieb und dem Kraftstoff technologieoffen unter Berücksichtigung der Klimaschutzziele zu prüfen.

Das Ziel besteht darin, die Einsatzbereitschaft und Mobilität der Bundespolizei und des Technischen Hilfswerks auch in schwierigen und komplexen Einsatzsituationen jederzeit und gleichzeitig möglichst klimaschonend in Zukunft sicherzustellen.

2.6 Einschätzung der Nutzbarkeit von Strom, Wasserstoff und Erd-/Methangas für Einsatz- bzw. Gefechtsfahrzeuge

Die Nutzbarkeit von alternativen Energieträgern für die Einsatz- bzw. Gefechtsfahrzeuge der Bundeswehr, der Bundespolizei und des Technischen Hilfswerks hängt maßgeblich von deren Leistungsprofilen, Leistungsdichte, ihrer Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit ab.

Vor allem in risikobehafteten Szenarien muss die Nutzbarkeit maximal hoch sein. Die NATO SFP gibt Rahmenbedingungen für solche Energieträger bezüglich der erforderlichen Interoperationalisierung vor.

Die Leistungsdichte und das Leistungsprofil der derzeit und in absehbarer Zeit zur Verfügung stehenden wiederaufladbaren Lithiumbatterien sowie der chemischen Energieträger Wasserstoff und Erd-/Methangas ist zu gering, um beispielsweise gepanzerte Fahrzeuge und Luftfahrzeuge im Einklang mit den politischen Vorgaben betreiben zu können.

2.7 Bewertung von synthetischen Kraftstoffen zur Nutzung für Einsatz- bzw. Gefechtsfahrzeuge

Synthetische Kraftstoffe können in Schiffen, Luft -und Landfahrzeugen zum Einsatz kommen.



Genormte synthetische Kraftstoffe sollten eine hohe Qualität im Hinblick auf ihre Verträglichkeit für Umwelt und Motoren haben, weil sie sich in bestimmten Eigenschaften von fossilen Kraftstoffen unterscheiden. Solche Eigenschaften sind bspw. in der DIN EN 15940 auch für synthetische, paraffinische Dieselkraftstoffe festgelegt.

Das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) unterstützt seit Jahren die Forschung an synthetischen Kraftstoffen. Taugliche Lösungen im industriellen Maßstab sind bisher nicht verfügbar, sollen aber durch das derzeit im Aufbau befindliche Forschungszentrum für CO₂-freie Kraftstoffe in Cottbus künftig adressiert werden.

2.8 Ausführung zu synthetischen Kraftstoffen

Ein großer Vorteil klimaneutraler synthetischer Kraftstoffe besteht darin, dass sie dieselben Kohlenwasserstoffe enthalten, wie zurzeit in Nutzung befindliche Kraftstoffe auf Mineralölbasis. Damit verfügen diese grundsätzlich über die gleichen physikalischen und chemischen Eigenschaften. Eine Nutzung als Drop-In-Kraftstoff ist ohne Änderung bestehender Antriebssysteme und Logistik grundsätzlich möglich.

Aufgrund ihrer Reinheit sind synthetischen Kraftstoffen Additive beizumischen, die in Kraftstoffen auf Mineralölbasis durch deren vergleichsweise hohe Heterogenität bereits enthalten sind. Klimaschädliche Bestandteile wie Schwefel- oder Stickstoffverbindungen kommen in synthetischen Kraftstoffen nicht vor.

Auch die bestehende Infrastruktur (bspw. Tankstellen) ist für solche Kraftstoffe schnell zu adaptieren. Die behördeneigene Logistik kann diese problemlos bewirtschaften und transportieren. Die Voraussetzung für die CO₂-neutrale Herstellung der synthetischen Kraftstoffe ist die Herstellung über regenerativ erzeugten Strom.

Somit besitzt ein solcher Kraftstoff als Energieträger ein sehr hohes Potential für die anstehende Dekarbonisierung und Defossilisierung.

3. Fazit

Eine robuste Notfallplanung zur Treibstoffversorgung ist von sehr hoher Bedeutung. Die Kraftstoffstrategie für kritische Infrastruktur baut weiterhin auf fossile Energieträger wie Ottokraftstoff, Dieselkraftstoff, leichtes Heizöl und Flugturbinenkraftstoff (JET A-1) auf.

Alternative Kraftstoffe zur Versorgung im Krisenfall sind absehbar nicht im erforderlichen Umfang verfügbar. Einsatzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind zur Gewährleistung der Inneren Sicherheit weiterhin notwendig. Hierfür sind die bestehenden gesetzlichen Regelungen für den Fall von Versorgungsstörungen weiterhin aktuell.

Der Erdölbevorratungsverband (EBV) hat die gesetzliche Aufgabe, für den Fall von Versorgungsstörungen ständig Bestände an Erdöl und Erdölerzeugnissen in der Höhe vorzuhalten. Die gesetzliche Vorratspflicht bemisst sich nach der durchschnittlich in 90 Tagen in die Bundesrepublik Deutschland eingeführten Menge an Erdöl und Erdölerzeugnissen.

Für eine mögliche Versorgung im Krisenfall erfasst das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) die Bedarfsträger nach §12 Abs.1. Satz 2 ErdölBevG und hält eine Datenbank dafür vor.

Für die erforderliche Logistik soll BALM gem. Verkehrsleistungsgesetz sorgen.

Die Vorräte sind so über das Gebiet der Bundesrepublik zu verteilen, dass in jeder von fünf definierten Versorgungsregionen mindestens sofort zugreifbare Bestände mit einer Reichweite von 15 Tagen vorhanden sind.

Von staatlicher Seite wird davon ausgegangen, dass Betreiber Kritischer Infrastrukturen eine Ersatzstromversorgung für 72 Stunden ohne Kraftstoffnachlieferung aufrechterhalten können, so wie es vom Bund (BBK) empfohlen wird. Spätestens nach 72 Stunden wird der Kraftstoff zur Betankung von Notstromaggregaten vor Ort benötigt. Maßnahmen zur Kraftstoffverteilung müssen somit sehr viel früher anlaufen, ggf. bereits mit Eintritt des Stromausfalls. Zudem stellt sich die Situation in der Krise vor Ort häufig anders dar, als dies pauschal angenommen wird.

Die Bundespolizei verfügt über 12 eigene Tankstellen, mobile Tankanlagen und Tankfahrzeuge, welche im Krisenfall die Mobilität und die Stromversorgung über Notstromaggregate sicherstellen sollen. Diese werden weiter vorgehalten und im Rahmen der verfügbaren Haushaltsmittel schrittweise ausgebaut.

Literatur

- Treibstoffversorgung bei Stromausfall Praxis im Bevölkerungsschutz Band
 https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-18-treibstoffversorgung-stromausfall.pdf?_blob=publicationFile&v=8
- [2] Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden Praxis im Bevölkerungsschutz – Band 13 https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-13-notstromversorgung-unternehmenbehoerden.pdf? blob=publicationFile&v=8
- KRITIS-Sektor: Transport und Verkehr https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/Sektoren-Branchen/Energie/energie node.html
- [4] Gemeinsames Positionspapier von Bundesinnenministerium und Bundesverteidigungsministerium: Sonderfahrzeuge sollen künftig mit alternativem Kraftstoff betrieben werden, 2021. <u>https://www.bmvg.de/de/aktuelles/fahrzeuge-bundes-energiewende-mix-machts-5038108#:~:text=Positionspapier%20zur%20Notwendigkeit%20der%20Nutzung%20von%20synthetischen%20Kraftstoffen%20als%20Download.&text=Ein%20Mix%20aus%20fossilen%20und,mittels%20erneuerbarer%20Energien%20erzeugt%20werden.</u>
- [5] NATO Single Fuel Policy SFP https://www.blauer-bund.de/2021/03/
- [6] DIN EN 15940; Kraftstoffe Paraffinischer Dieselkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren Anforderungen und Prüfverfahren;

Georg Klepp

Abstract

In the future the digital fuel twin will be of increasing importance, the design and structure of these fuels twins is an actual research topic. Digital twins and digital threads are of great importance for life cycle management but also in research and development. Fuel twins are also essential in dealing with regulatory requirements. Digital twins for materials, as the digital fuel twin, have different requirements and pose different challenges as the established digital twins for machines. Depending on the composition, the properties are determined using large data models. The database for these digital twins has also a quantum of uncertainty. In addition, data provenance and data security have to be taken into account.

1. Kraftstoffe

Erneuerbare Kraftstoffe sind Kraftstoffe, die aus nicht-fossilen Quellen gewonnen werden. Nachhaltige Kraftstoffe erfüllen Nachhaltigkeitskriterien während ihres Produktionszyklus und die Treibhausgas-Emissionen sind über den gesamten Lebenszyklus im Vergleich zu fossilen Brennstoffen deutlich geringer. Diese umfassende Definition ermöglicht vielfältige Produktionswege, die verschiedene bio-basierte Rohstoffe, erneuerbare Energie, aber auch fossile Energieeinträge umfassen. Darüber hinaus können alternative Kraftstoffe mit fossilen Brennstoffen gemischt oder im Wechsel verwendet werden, was zu unterschiedlichen Reduktionspotenzialen für Treibhaus-Emissionen führt, je nach Mischungsverhältnis und Auswahl der Ausgangsstoffe.

Um die Nutzung verfügbarer Mengen zu optimieren sowie regulatorischen Maßnahmen zu entsprechen, ist eine umfassende Erfassung und Verfolgung von Daten und Informationen über den gesamten Lebenszyklus des Kraftstoffes erforderlich. Dazu soll der digitale Kraftstoffzwilling dienen.

Auf der Grundlage von gesammelten Daten können durch Computermodelle Vorhersagen zur Bewertung des Kraftstoffverbrauchs über dessen Lebenszyklus hinweg schon vor der tatsächlichen Bereitstellung und Verbrennung durchgeführt werden. Diese Modelle ermöglichen die Vorhersage von Kraftstoffeigenschaften, die Bewertung der Empfindlichkeit der Verbrennung gegenüber variierenden Zusammensetzungen oder die Abschätzung der Auswirkungen auf das Klima. Durch die Integration von realen Daten in diese Modelle wird ein "digital thread" (digitaler Faden) geschaffen, der eine ganzheitliche virtuelle Darstellung des Kraftstofflebenszyklus und seiner Auswirkungen darstellt. Innerhalb dieses Rahmens ahmen digitale Zwillinge den Lebenszyklus des betreffenden Kraftstoff nach und spiegeln seinen Weg entlang dessen Lebenszyklus genau wider. Dabei kann der "digital thread" (digitaler Faden) mehrere interagierende digitale Zwillinge enthalten, zum Beispiel bei der Mischung von Kraftstoffen. Angesichts der Vielzahl von Datenquellen, die zu digitalen Zwillingen beitragen, ist das Management der Datenherkunft entscheidend: Die Quellen und die Verbindungen, die Eigenschaften und die Qualität von Daten müssen im System angemessen abgebildet werden. Der Kraftstofflebenszyklus umfasst verschiedene Phasen, vgl. Bild 1, darunter die Produktion der Ausgangsstoffe, deren Transport und anschließende Verarbeitung zu nachhaltigen Kraftstoffen sowie deren Verteilung. Jede Phase umfasst spezifische Prozesse, die auf den gewählten Produktionsweg und die Nutzungsstrategie zugeschnitten sind. Operationen innerhalb dieses Lebenszyklus generieren Informationen und Daten zu Aspekten wie CO₂-Emissionen, chemischer Zusammensetzung und lokalen Emissionen. Auf der Grundlage dieser Informationen können Entscheidungen getroffen werden, bezüglich des Kraftstoffs und seiner Nutzung.



Bild 1: Kraftstofflebenszyklus.

2. Digitaler Zwilling und "digital thread" (digitaler Faden)

Digitale Zwillinge entwickeln sich zu leistungsstarken Werkzeugen zur Optimierung der Leistung einer Vielzahl komplexer physischer Maschinen, Anlagen und Komponenten sowohl in der Entwicklung aber auch entlang des Produktlebenszyklus. Ein digitaler Zwilling ist im Allgemeinen darauf ausgelegt, eine genaue virtuelle rechnergestützte Repräsentation der Form und der funktionalen Reaktion eines bestimmten (einzigartigen) physischen Zwillings bereitzustellen. Dieses Konzept kann auch auf Materialien und Werkstoffe, und somit auch auf Kraftstoffe, übertragen werden.

Hier wird ein Ansatz vorgestellt, wie das Konzept des digitalen Zwillings und des "digital thread" (digitalen Fadens) auf Kraftstoffe übertragen werden kann, um die Nutzung erneuerbarer nachhaltiger Kraftstoffe voranzutreiben und Kraftstoffinnovationen zu beschleunigen. Der Kraftstoff selbst kann als ein hochkomplexes mehrskaliges physikalisches System betrachtet werden, dessen Form (d. h. Details der chemischen Zusammensetzung sowie des Materialverhaltens) und Funktion (d. h. Reaktion auf äußere Einflüsse, die typischerweise durch geeignet definierte Materialeigenschaften charakterisiert werden) sowie Herkunft und Herstellung geeignet in einem digitalen Zwilling erfasst werden können. Entsprechend kann der digitale Zwilling die Wandlung des Kraftstoffs im Laufe der Zeit darstellen, sowohl hinsichtlich der Prozessgeschichte als auch der Einsatzumgebung, wodurch sich ein "digital thread" (digitaler Faden) ergibt.

Der "digital thread" (digitale Faden) ist aus der Digitalisierung des Produktlebenszyklusmanagements in zahlreichen Branchen entstanden. Diese "digital threads" (digitale Fäden) sammeln, verwalten und speichern alle Daten und Informationen, die in allen Phasen des Produktlebenszyklus generiert werden. Ein wesentliches Merkmal der "digital thread" ist, dass sie sowohl die virtuellen Aktivitäten (z. B. modellbasiert) umfassen als auch physische Aktivitäten (z. B. Messungen während der verschiedenen Phasen der Entstehung, Prüfung und des Betriebs des Produkts) einbeziehen. Dadurch werden neue Möalichkeiten für die Erstellung und Nutzung von virtuellen Abbildungen des physischen Objekts eröffnet. Die jüngsten Fortschritte in den Bereichen Digitalund Sensortechnologie sowie Rechnerleistung ermöglichen es, dass virtuelle Objekte neben ihren physischen Gegenstücken existieren können. Neben der Nachbildung der physischen Objekte bieten die virtuellen Abbildungen ein großes Potenzial für ein konsistentes Änderungsmanagement, welches die Optimierung der beabsichtigten oder unbeabsichtigten Änderungen des Produktes im Laufe der Zeit ermöglicht. Daher kann ein digitaler Zwilling in diesem Zusammenhang als hochwertige digitale-Repräsentation definiert werden, die das Aussehen und die funktionale Reaktion eines bestimmten (einzigartigen) physischen Zwillings genau widerspiegelt.



Bild 2: Kraftstoffe: Physikalischer Zwilling (links) und digitaler Zwilling (rechts).

3. Digitaler Zwilling für Kraftstoffe

Digitale Zwillinge wurden bisher in der Fertigung und Leistungsbewertung komplexer technischer Systeme (z. B. Motoren) und/oder ihrer Komponenten eingesetzt, wobei der Schwerpunkt weitgehend auf der genauen Erfassung der makroskaligen Geometrie und der leistungsbezogenen Größen der Komponentenebene lag. Für die Erfassung und Archivierung von Stoffeigenschaften, die typischerweise mit physikalischen Phänomenen auf niedrigeren Materiallängenskalen (typischerweise im Bereich von

atomar bis makroskalig) zu tun haben, wie sie z.B. für Kraftstoffe notwendig sind, haben sich noch keine Methoden etabliert. Eine erfolgreiche Erweiterung des Konzepts eines digitalen Zwillings, die Stoffeigenschaften einbezieht, ermöglicht eine vollständig integrierte ganzheitliche Betrachtung. Neben physikalischen können auch weitere, z.B. regulatorische Kriterien mit einbezogen werden, vgl. Bild 2.

Kraftstoffe sind hochkomplexe mehrskalige multiphysikalische Systeme. Ihre Produktion und ihre Reaktionen bei der Verbrennung im Motor werden von einer Vielzahl von Phänomenen gesteuert, die in Längenskalen von atomar bis makroskalig und in gleichem Maße in verschiedenen Zeitmaßstäben auftreten. Dies führt dann auch zu einer Vielfalt der relevanten Daten.

Der digitale Zwilling, d.h. die virtuelle Repräsentation des Kraftstoffs, bildet das Kernstück des "digital thread" (digitalen Fadens). Im digitalen Zwilling werden Kenntnisse über den realen Kraftstoff gesammelt und verarbeitet. Dies umfasst alle Informationen, die den Kraftstoff charakterisieren, wie er ist sowie wie er sein könnte. Während sich ersteres von während der Laufzeit des digitalen Zwillings gesammelten Daten ableiten lässt, umfasst letzteres beispielsweise Ergebnisse und Erkenntnisse aus modellbasierten Vorhersagen.

Die chemische Zusammensetzung des Kraftstoffs bildet die Grundlage für die Charakterisierung des Kraftstoffs. Aus dem Wissen über den Zwilling können für einen Zustand physikalische Eigenschaften abgeleitet werden, beispielsweise die Dichte oder die Viskosität.

Transformationen verändern grundlegende Merkmale des digitalen Zwillings (z.B. die chemische Zusammensetzung). Ein einfaches Beispiel hierfür ist das Mischen des Kraftstoffs mit einem anderen Kraftstoff, wodurch sich die Zusammensetzung ändert.

Operationen speisen Informationen in den digitalen Zwilling ein. Beispiel hierfür sind Informationen aus Sensoren, wie z.B. die Temperatur.

Schließlich müssen Einschränkungen berücksichtigt werden, z.B. unter Verwendung einer Kostenfunktion. Ein Beispiel für eine solche Einschränkung sind Grenzwerte für Emissionen oder betriebswirtschaftliche Aspekte.

4. Modellierung

Die mathematische Beschreibung des digitalen Zwillings stellt sicher, dass die stoffliche Zusammensetzung mit ausreichender Genauigkeit erfasst und wiedergegeben wird und daraus die relevanten Stoffwerte und -eigenschaften in Abhängigkeit von den Einflussgrößen (Transformationen, Operationen) abgeleitet werden können. Diese Vorhersagen sind mit Unsicherheiten behaftet, die sich aus den Unsicherheiten der Datenbasis ergeben, und ebenfalls bestimmt werden müssen.

Die relevanten Stoffgrößen und -eigenschaften können deterministisch aus der Kraftstoffzusammensetzung bestimmt werden, sind jedoch mit Unsicherheiten behaftet. Der Zusammenhang zwischen Stoffgrößen und -eigenschaften und der Kraftstoffzusammensetzung, den Zustandsgrößen und der Vorgeschichte wird durch geeignete Korrelationen bestimmt. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge sind hier einfache Korrelationen oft zu ungenau und eine Beschreibung auf der Basis physikalischer Grundgesetze in der Regel zu aufwändig. Hier ist darum der Einsatz künstlicher Intelligenz und maschinellen Lernens entscheidend, um diese Zusammenhänge abzuleiten. Um die Unsicherheiten zu berücksichtigen, müssen probabilistische Methoden des maschinellen Lernens herangezogen werden. Viele dieser Methoden benutzen als Grundlage neuronale Netze (s. A1). Die Unsicherheiten können dabei z.B. über Monte-Carlo Methoden (s. A2) berücksichtigt werden.

4.1 Datenbasis für Stoffeigenschaften

Stoffeigenschaften können durch Messungen bestimmt, aber auch auf der Basis von Modellen vorhergesagt werden. Konventionelle sowie alternative Kraftstoffe sind hochkomplexe Gemische aus Hunderten möglicher Kohlenwasserstoffkombinationen, was zu einer sehr hohen Anzahl der Zusammensetzungen führt. Hier muss durch eine geeignete Definition der relevanten Kraftstoffzusammensetzung die Anzahl der möglichen Variationen (Dimensionalität) verringert werden. Einige der möglichen Betriebsbereiche sind messtechnisch schwer zu bestimmen. Physikalische Modelle sind mathematisch komplex und durch die Modellannahmen in ihrem Geltungsbereich eingeschränkt. Bei datengetriebenen Modellen wird für das maschinelle Lernen eine ausreichende Datenbasis benötigt, die trotz der oben genannten Einschränkungen in ausreichender Größe und ausreichender Genauigkeit vorliegen muss.

4.2 Datenherkunft

Neben den Daten selbst, ist auch die Datenherkunft ein wichtiges Thema. Informationen darüber, wo Daten herkommen (Provenienzdaten) und wie sie sich verändern (Provenienztransformation) müssen berücksichtigt werden. Die Datenherkunft spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der Datenqualität, der Nachverfolgung von Fehlern, der Überprüfung von Daten und dem Verständnis der Abhängigkeit zwischen den Daten.

Datenherkunftsmodelle spielen eine entscheidende Rolle bei der Sicherstellung der Datenqualität, der Nachverfolgung der Herkunft und dem Verständnis des komplexen Geflechts von Datentransformationen. Im Rahmen eines Unsicherheitsmanagements müssen die Unsicherheiten in der Modellvorhersage berücksichtigt werden.

4.3 Digitale Infrastruktur

Die digitale Infrastruktur unterstützt die Erfassung, Speicherung, Verwaltung und Verarbeitung von Daten. Die Schaffung einer robusten digitalen Infrastruktur ist entscheidend für die Verwirklichung eines digitalen Zwillings, da dieser nur durch die Zusammenführung mehrerer unterschiedlicher Datenströme (z. B. Simulationsdaten, Experimentaldaten, Echtzeit-Sensordaten) existieren kann. Diese Datenströme stellen Herausforderungen dar, sowohl bezüglich der Vielfalt als auch des Volumens der aufgenommenen Daten sowie aller zugehörigen Metadaten aber auch der Vielzahl der Datenquellen.

4.4 Messdaten

Messungen quantifizieren verschiedene Merkmale des Kraftstoffes, aber auch Merkmale der Einflussgrößen auf den Kraftstoff. Es ergeben sich einerseits Werte und
ebenfalls die damit verbundenen Unsicherheiten. Dabei gibt es eine Vielzahl von Methoden, die eingesetzt werden. Hier soll nur kurz auf zwei Aspekte eingegangen werden:

Der digitale Datenstrom wird zunehmend in den Instrumenten verankert, die zur Messung von Materialeigenschaften verwendet werden. Heutzutage sind nicht nur Datenströme digitalisiert worden, sondern zunehmend sind auch die Datensammlungsinstrumente vernetzt und ferngesteuert zugänglich. Die Vorgaben zur Interkonnektivität sind stark unterschiedlich. Dabei bestehen Bedenken hinsichtlich der Cyber-Sicherheit sowohl der Daten als auch der Instrumente.

Mit dem Fortschritt bei Messsensoren, Datenübertragung und Datenspeicherung werden die Datenströme immer größer und erfordern durchdachte Strategien für eine intelligente Datenreduktion.

5. Zusammenfassung

In Zukunft wird die Digitalisierung weiter fortschreiten und Bereiche erfassen, die aktuell noch nicht durchdrungen sind. Ein Beispiel für diesen Fortschritt ist der Ansatz, auch Materialien als digitale Zwillinge zu erfassen, der aktuell Stand der Entwicklung ist: Die dafür notwendigen Ansätze und Methoden werden entwickelt und erprobt. Einige dieser Ansätze wurden hier vorgestellt

Die Abbildung von Kraftstoffen ist hierbei eine große Herausforderung, aufgrund der komplexen physikalischen Zusammenhänge sowie der regulatorischen und betriebswirtschaftlichen Anforderungen. Besonders für gesetzliche Vorgaben, wie z.B. zu Nachhaltigkeit und Treibhausgasemissionen, bietet der digitale Zwilling, der diese Daten vorhält, Vorteile bei der Umsetzung.

Der digitale Kraftstoffzwilling wird in Zukunft verstärkt an Bedeutung gewinnen; jetzt besteht die Möglichkeit, diesen zu gestalten.

Anhang

A1 Neuronale Netze

Neuronale Netze, auch als künstliche neuronale Netzwerke bezeichnet, sind Strukturen, die sich an den Aufbau und die Funktionsweise des menschlichen Gehirns anlehnen. Sie bestehen aus vielen miteinander verbundenen künstlichen Neuronen, die Informationen verarbeiten und weiterleiten.

Ein künstliches neuronales Netz besteht aus verschiedenen Schichten:

Eingabeschicht (Input Layer): Hier nehmen die Neuronen Informationen aus der Außenwelt auf und geben sie gewichtet an die nächste Schicht weiter.

Verborgene Schicht (Hidden Layer): Diese Schicht kann aus beliebig vielen Neuronen-Ebenen bestehen. Hier werden die Informationen weitergereicht und in jeder Ebene neu gewichtet. Die genaue Verarbeitung ist dabei nicht sichtbar ist, sie funktioniert als "Black Box".

Ausgabeschicht (Output Layer): Die Neuronen geben die verarbeiteten Informationen als Ergebnis aus.



A2 Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation ist ein Verfahren der Wahrscheinlichkeitsrechnung, bei dem wiederholt Zufallsstichproben einer Verteilung mithilfe von Zufallsexperimenten bestimmt werden. Das Ziel besteht darin, analytisch nicht oder nur aufwendig lösbare Probleme numerisch zu lösen, indem man Zufallsstichproben verwendet. Die Grundlage dieser Methode bildet das Gesetz der großen Zahlen, d.h. es muss eine ausreichende Menge an Zufallsstichproben bestimmt werden. Diese Zufallsexperimente werden durch Computerberechnungen mittels Monte-Carlo-Algorithmen simuliert.

Literatur

Enderle, Benedict, et al. "A proposed Digital Twin concept for the smart utilization of Sustainable Aviation Fuels." *AIAA SciTech 2022 Forum*. 2022.

Freund, Alexander. "Workflows für exponentielle Produktivitätssteigerung." *maschinenbau* 4.2 (2024): 22-25.

Lieth, Torstrick. "(Ver-) Schlüsseltechnologie: Datensicherheit durch digitalen Zwilling." (2018).

Lindner, Martin. "Optimierung des Flugzeugeinsatzes nach Brennstoffeffizienz." (2023).

Massonet, Angela, Raphael Kiesel, und Robert H. Schmitt. "Der digitale Zwilling über den Produktlebenszyklus." *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115.s1 (2020): 97-100.

Müller-Gronbach, Thomas, Erich Novak, und Klaus Ritter. "Monte Carlo-Algorithmen." Springer-Verlag, 2012.

Ritter, Helge, Thomas Martinetz, und Klaus Schulten. "Neuronale Netze." *München: Addison-Wesley* (1991).

Marko Babic

Abstract

The Digital Fuel Twin (DFT) as a cloud solution delivers certificates of CO₂ footprint of fuels distributed along the fuel supply chains. Those certificates can be utilized in businesses of different stakeholders like fleet and logistics customers.

- The DFT consists of an orchestrated data lake with private, encrypted data rooms of individual stakeholders who can upload their data via a standard interface.
- Based on a data sharing agreement a DFT algorithm gets the encryption key from the single stakeholders to access specific data points along the supply chain, and this way to represent a logical link of the fuel distribution.
- Additionally, the DFT includes plausibility monitoring checks, considering blending or mixing of different fuels along the fuel supply chain up to the filling station as well as to the vehicle tank.
- As a result of the DFT service, the end customer receives a CO₂ footprint certificate to be utilized in his further businesses.

1. Motivation

In einer dedizierten Product Area entwickelt BOSCH Lösungen, um datenbasiert, mit intelligenter Vernetzung der vorhandenen Infrastruktur und der Bestandsflotten bestmögliche Emissionsreduzierung zu ermöglichen. Gemäß Bild 1 liegt gerade in den Bestandsflotten großes Potenzial zur Defossilisierung des Transportsektors, vorausgesetzt dass entsprechende Kraftstoffe zur Verwendung kommen.





110

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. Um die Masse an Bestandsfahrzeugen auch bei höheren Preisen CO₂-reduzierter Kraftstoffe einzubinden, bedarf es wirksamer Marktmechanismen, mit Hilfe derer die Mehrkosten transparent auf die Marktteilnehmer, Produkte und Dienste weitergegeben bzw. kompensiert werden.

Der digitale Kraftstoffzwilling liefert genau diese Transparenz entlang der Kraftstofflieferketten sowie die entsprechenden Nachweise/Zertifikate für deren Weiterverwendung in Kundenanwendungen.

2. Funktionsprinzip des digitalen Kraftstoffzwillings

Der digitale Kraftstoffzwilling digitalisiert die gesamte Kraftstofflieferkette von der Herstellung bis hin zum Endverbraucher, mit dem Ziel einer genauen, zertifizierten Nachweisführung des CO₂-Fußabdrucks der verbrauchten Kraftstoffmengen (Bild 2).



Bild 2: Digitalisierung der gesamten Kraftstofflieferkette

Dabei legen die einzelnen Marktteilnehmer entlang der Lieferkette ihre spezifischen Daten in ihren privaten Datenräumen ab, so dass die Daten nur für diese jeweils einsehbar sind (Bild 3).



Bild 3: Funktionsprinzip des digitalen Kraftstoffzwillings

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. Gemäß einer mit BOSCH als DFT-Betreiber abgeschlossenen Datennutzungsvereinbarung erlauben die einzelnen Marktteilnehmer dem DFT-Algorithmus spezifischen Zugriff auf einzelne Datenpunkte, so dass DFT als Service eine logische, sichere Ende-zu-Ende-Verknüpfung vom Hersteller bis hin zum Verbraucher darstellen kann.

Dabei wird die bewährte Flexibilität der einzelnen Teilnehmer weiterhin unterstützt, sei es beim Einkauf und der Belieferung von verschiedenen Zulieferern entlang der Kraftstofflieferkette oder auch in der Nutzung und Mischbetankungen im Flottenbetrieb.

Final wird einem Flottenbetreiber ein exakter CO₂-Fußabdruck ausgewiesen, welcher ohne Mehraufwand, transparent und risikofrei weiterverwendet werden kann.

3. Anwendungen des digitalen Kraftstoffzwillings in der Praxis

Der durch den DFT gelieferte CO₂-Fußabdrucknachweis kann wirksam im Markt weiterverwendet werden, sei es bei der Erstellung von Umweltberichten oder als Nachweis für Finanzgeber und weitere Vertragspartner, bis hin zur Verwendung im Marketing und Vertrieb entsprechender klimafreundlicher Produkte und Dienste (Bild 4).



Bild 4: Einsatzmöglichkeiten von DFT-Verwendungsnachweisen

Für all diese Einsatzmöglichkeiten bedarf es verlässlicher, nachprüfbarer, transparenter, auditfester und vor allem leicht und auf Knopfdruck verfügbarer Nachweise.

Bei entsprechendem Vorgehen können die Mehrkosten der Nutzung CO₂-reduzierter Kraftstoffe weitestgehend mit Mehrwert transparent weitergegeben werden.

Dies wird im Bild 5 am Beispiel eines Geschäftswagens verdeutlicht. Bei angenommenen monatlichen Gesamtkosten von über eintausend Euro fallen die angesetzten Zusatzkosten in Höhe von 25 Euro bei einer ausschließlichen Verwendung von HVO100-Kraftstoffen mit ca. 90% reduziertem CO₂-Fußabdruck nur marginal ins Gewicht.

			Date	Refueled	CO2		8	Calculatio add-on co	n example: st for renewak	ole fuel
			03.01.2023	82,3 L	20%				Passenger Car	Truck
05.06.2	023 48,3L	Q	04.01.2023 06.01.2023 07.01.2023	72,5 L 83,1 L 94 2 L	0% 25% 0.90%	03.11.2023 04.13.2022 503.2		CO2 reduction	7L / 100 km	30L / 100 km
07.06.20	023 50,1 L	50,1L	08.01.2023	71,9 L	0%	06.14.2023 498,3 07.05 223 390	L P	-10%	+0,1 Cent/km	+1,5 Cent/km
10.06.	2023 42,2 L 2023 37,9 L	R O	11.01.2023	99,8 L 79,9 L	90% 90%	08.06.2023 512,2 L 11.01.2022 504 91	9	-20%	+0,3 Cent / km	+3,0 Cent / km
13.06	.2023 38,1L 2023 49,9L	¥	15.01.2023	84,3 L 75,3 L	♀ 90% ♀ 25%	12.01.2023 398,6L	Dir.	-30%	+0,4 Cent / km	+4,5 Cent/km
14.00	5.2023 53,3 L	UI UI	17.01.2023	62,7 L	♀ 90%	15.01.2023 511,3L	Q	-50%	+0,7 Cent / km	+7,5 Cent/km
18.0	6.2023 52,7		Total :	54% CO	2-reduced	503,6L	Q	-90%	+1,4 Cent / km	+15,0 Cent / km
Ŧ	Calculation e Extra cost for ca Average consur Mileage per mo	xample (for a irbon-reduced f nption nth	given leasing co uel: +0,20 Ø 7,0 1.800	ntract for a bu) € / Liter (for) Liter / 100km) km	isiness passenge HVO100) 1	r car):	2	assumption: 0,20 €/L pric compared to	e add-on for HVC classic Diesel	>
	Additional Cos @ monthly leas	t: ng rate	25 € ,	/ month ~	2% additional c for 90% CO ₂ red	ost luction		* compared to fos	sile fuel usage only	

Bild 5: Beispiel zu Mehrkosten und Mischbetankung mit CO2-reduzierten Kraftstoffen

Mit dem digitalen Kraftstoffzwilling wird jedoch auch die Mischbetankung von CO₂reduzierten und fossilen Kraftstoffen nachverfolgt, so dass entsprechend auch geringere Zusatzkosten transparent nachweisbar sind. Vielmehr kann hierdurch der Auftraggeber je nach Budget flexibel, aktiv steuern, wie viel CO₂-Reduzierung es geben soll.

Somit ist mit dem Wirkmechanismus der Klimaschutz mit Centbeträgen an Mehrkosten darstellbar.

X-in-the-Loop Concept for the Integration of Simulation and Experiment for Fuel Cell Systems

Tancrède Oswald, Lukas Weiß, Michael Wensing

Kurzfassung

Wasserstoff ist ein prominenter Vertreter der alternativen Kraftstoffe für stationäre und mobile Anwendungen. Neben der Nutzung in Verbrennungskraftmaschinen kann Wasserstoff auch in Brennstoffzellen zur Leistungsbereitstellung genutzt werden. Hier soll ein Einblick in die Herausforderungen der Brennstoffzellensystementwicklung gegeben und ein Weg aufgezeigt werden, wie diesen begegnet werden kann.

Die hohen Entwicklungszeiten und -kosten in der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen für industrielle Anwendungen haben viele Ursachen. Zwei große Hürden sind die inhärent komplexe Vorhersage des elektrochemischen Verhaltens der Brennstoffzelle sowie die ressourcenintensive Untersuchung der Systeme. Diese Probleme verstärken sich: Der Aufbau eines nutzbaren Brennstoffzellenmodells ist mit langen Testphasen verbunden und garantiert nicht die Aussagekraft der Ergebnisse außerhalb der getesteten Bereiche oder gar für andere MEA- (Membrane Electrode Assembly-) Zusammensetzungen.

Der hier gezeigte Vorschlag zur Erleichterung des Entwicklungsprozesses besteht in der Verwendung eines "X in the Loop"-Konzepts. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die direkte Integration der Probe, hier einer einzelnen Brennstoffzelle, in die Modellumgebung des gesamten Systems.

Zwei Strategien mit unterschiedlichen Integrationsstufen wurden definiert und werden hier beschrieben. Beide gehen von einem vorgegebenen Leistungsprofil für die spezifische Anwendung aus. Die erste Strategie besteht darin, die Betriebsparameter der Probe aus einem Brennstoffzellensystemmodell abzuleiten und sie der Probe auf dem Prüfstand aufzuprägen. Das gemessene Verhalten der Probe kann verwendet werden, um das entworfene System zu validieren oder Parameter des Brennstoffzellenmodells zu aktualisieren. Die zweite Strategie geht einen Schritt weiter in Richtung Integration der Probe in das Modell. Hier wird das Kernmodell der Brennstoffzelle innerhalb des Brennstoffzellensystemmodells vollständig durch die Probe ersetzt, was den Bedarf eines detaillierten elektrochemischen Modells reduziert und die Vorhersage des Verhaltens des Brennstoffzellensystems verbessert.

1. On the Cost of Fuel Cell System Development

Hydrogen is a promising alternative source of energy for stationary and mobile applications alike [1]. It can be used to provide power through internal combustion or fuel cells [2][3]. Here, some of the challenges of fuel cell systems development are highlighted and a possible solution is proposed.

The core of a hydrogen Fuel Cell System (FC-System) is the Membrane Electrode Assembly (MEA) which converts hydrogen and oxygen to electricity and water. The

combination of the MEA with the bipolar plates is called the Fuel Cell (FC). To increase the voltage and therefore the power output, several FCs can be joined together in series, resulting in a fuel cell stack (FC-Stack). Proper operating conditions for the FC-Stack are ensured by the Balance of Plants (BOP).

Among the difficulties of FC-System development, two are particularly important. First, the electrochemical behaviour of FC-Systems is inherently difficult to predict. Second, testing FC-Systems is resource intensive. These issues compound: Setting up an accurate model of a FC-System incurs long testing periods and does not guarantee acceptable results outside the tested parameters or for other MEA compositions. Please refer to the following literature for more in-depth information about the current state of fuel cell modelling and testing: [4][5][8][9][10].

2. Proposal: Integrated Workflow of Model and Testing

To alleviate the issues leading to high costs in FC-Systems development, an X-in-the-Loop (X-IL) concept is explored and adapted [6][7]. Essentially, this is the direct integration of the test sample, here a single fuel cell, into the modelling environment of the whole system. The strategy relies on three systems, the test bench, the simulation model, and the communication framework.

The test bench is fitted with a single FC or a small FC-Stack. The main requirements are the precise setting of the test sample state as well as the accurate measurement of the test sample response. The goal is to be able to replicate the state of the cell as if it were in a FC-System. The model is a description of the other FCs of the Stack, the FC-Stack, the BOP, and any further systems influencing the behaviour of the FC. The duty of the communication framework is the fast, reliable, and user-friendly connection between the model and the test bench.

Using the X-IL concept, the effort for the analysis of new cell materials, new flow field concepts, new BOP concepts and designs, new FC-System applications, or new operating strategies should be reduced.

X-IL allows for many different strategies. The decision was taken to further investigate two of them, as described in the following sections. The overarching inputs and outputs of the two strategies are the same in nature. The engineer defines a load profile to be investigated as well as a description of the BOP and FC-System from which a complete description of the FC-System behaviour is calculated. The hole X-IL system can therefore be used for investigation and design purposes.

2.1 Strategy A: Model Supported by Testing at Run-Time

The first strategy consists of running the model and the test bench in parallel. The operating procedure is as follows. Based on the given load profile, the model calculates relevant application-specific states for the FC. A simple method could be to use a histogram of the demanded states as well as a selection of extreme operating conditions. Then, the chosen states are automatically tested on the test bench. Using the results, the FC-Model is updated, ensuring a closer representation of the test sample. After updating, the simulation is re-run, new application-specific test states are calculated, which in turn get tested and improve the model accuracy. Of course, already tested states do not need to be re-analysed. However, this could be done on a random basis

to ensure the stability of the procedure. The whole process can be repeated until a satisfying result is achieved. Figure 1 illustrates this procedure.



Figure 1: Overview of the model supported testing strategy.

Major challenges accompanying this strategy are the informed yet automised selection of testing states for the FC, the repeatability of testing for FCs, and the capability of the FC-Model to fit the tested states sufficiently well enough.

The advantageous reduction of testing time could be achieved through:

- focusing on application specific states, and
- automated and standardized results, which are integrated into future testing.

Additionally, the accuracy of the electrochemical modelling of the FC has a reduced impact on the model performance.

2.2 Strategy B: Model with Fully Integrated Testing

The second strategy displays a concept to fully integrate testing into the solving of the FC-System model.

The procedure in this case is a loop over every time step of the simulation, as shown in Figure 2. First, the FC state is estimated using a complete model of the FC and the BOP. This state is then used as the starting value for a second model, where the FC model is replaced by the test bench. In other words, the equations representing the FC behavior are replaced by the test bench. To solve this second model, a method like Newton's method can be applied. For every step of the solving procedure, the response for the current state as well as the derivatives are needed from the test sample in the test bench. The measurements from the test bench can in turn be used to improve the model.

The challenges posed by this method are the need for fast state setting on the FC test bench, the accurate measurement of relevant process parameters and the solver stability.

The main advantages of this method are:

- a very accurate description of the system behaviour,
- a simplified model,
- the need for only one iteration over the load profile, and
- the improvement of the model at every time step.



Figure 2: Overview of the integrated X-IL Strategy

3. Software Framework enabling X-IL Strategy

The basic task of the software framework is to allow for quick and reliable communication between a FC-System model and a FC test bench. This includes controlling the model, essentially defining what has to be calculated and when, and then translating the outputs of the model into sensible inputs for the test bench. Additionally, data management and user interface functionalities need to be covered.

The framework needs to be modular, for maintenance and future development purposes. It needs to be accessible, meaning that research engineers should be able to work with the framework assuming a short introduction. Finally, the framework needs to be efficient and open for distributed computation. The latter gains importance, once more complex FC models are needed and the required computing power increases.



Figure 3: Overview of the software framework.

The model is written in Modelica, an equation-based, a-causal modelling language. However, the software framework can work with any type of FMU-compiled model. The testbench features a Programmable Logic Controller (PLC) for the test bench state machine, safety features and basic operation. The code here is written in structured text. The interface to the framework is an OPC-UA server.

The test bench automation, the user interface, and the data management are built as HTTP-Servers. This allows a very flexible architecture, adaptable to a variety of test benches. For even more flexibility, the servers can be distributed on multiple hardware machines.

The compiled model is controlled via multiple TCP-Servers. This protocol is useful here since a continuous stream of calculation is to be expected. Furthermore, it allows for the integration of the model in many other applications, such as design software or

0/

vehicle simulators. For the necessary steps of preprocessing, execution, post-processing and communication to other services, individual TCP-Servers are set up. Again, this is done to enhance the modularity of the system.

The last link between the model and the test bench with their respective control architectures is realized through a HTTP-Server on the test-bench control side communicating via TCP with the TCP-Server responsible for the communication.

In short, the data flows from the model through some TCP-servers to an interface in the form of a HTTP-Server. From there it is send to the PLC of the test bench through an OPC-UA server.

4. Conclusion

118

This contribution described an X-in-the-Loop concept potentially capable of tackling time and cost issues in the development process of fuel cell systems. The first core challenge to this solution is the communication and control of the FC-System model with the test bench. Here, a large part of the software framework is already developed and will be tested on an experimental test bench. The second challenge is the development of a FC test bench corresponding to the requirements of fast, yet accurate measurements. First impressions of this test bench can be seen in Figure 4.



Figure 4: Impressions of the test bench

Literature

- S. S. Ravi and M. Aziz. 2022. Clean hydrogen for mobility Quo vadis? DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.04.158
- [2] D. Calandra, T. Wang, M. Cane and S. Alfiero. 2023. Management of hydrogen mobility challenges: A systematic literature review. DOI: <u>10.1016/j.jcle-pro.2023.137305</u>
- [3] T. Jamal et al. 2023. Fuelling the future: An in-depth review of recent trends, challenges and opportunities of hydrogen fuel cell for a sustainable hydrogen economy. DOI: <u>10.1016/j.eqyr.2023.09.011</u>
- [4] E.J.F. Dickinson, G. Smith. 2020. Modelling the Proton-Conductive Membrane in Practical Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Simulation: A Review. DOI: <u>10.3390/membranes10110310</u>
- [5] M. Arif, S.C.P Cheung, J. Andrews. 2020. Different Approaches Used for Modeling and Simulation of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: A Review. DOI: <u>10.1021/acs.energyfuels.0c02414</u>
- [6] V. Schreiber, K. Augsburg, V. Ivanov and H. Fujimoto. 2020. Novel Developing Environment for Automated and Electrified Vehicles using Remote and Distributed X-in-the-Loop Technique. DOI: <u>10.1109/VPPC49601.2020.9330996</u>
- [7] R. O. Nemes et al. 2023. X-in-the-Loop-Based High Accuracy Test Facility for Industrial Development of Electric Vehicles. DOI: <u>10.1109/TTE.2022.3224518</u>
- [8] M. Garcia-Camprubi, S. Izquierdo and N. Fueyo. 2014. Challenges in the electrochemical modelling of solid oxide fuel and electrolyser cells. DOI: <u>10.1016/j.rser.2014.02.034</u>
- [9] M.U. Karaoglan et al. 2021. Comparison of single-cell testing, short-stack testing and mathematical modeling methods for a direct methanol fuel cell. DOI: <u>10.1016/j.ijhydene.2020.02.107</u>
- [10] J. Breitinger, M. Hellmann, H. Kemmer and S. Kabelac. 2023. Automotive Fuel Cell Systems: Testing Highly Dynamic Scenarios. DOI: <u>10.3390/en16020664</u>

Optische Untersuchung der Wasserstoffverbrennung am Einzylinder-Transparentmotor

Philipp Borken, Lukas Link, Hauke Hansen, Friedrich Dinkelacker

1. Motivation und Methodik

Zur Dekarbonisierung des Nfz-Sektors stellt Wasserstoff aufgrund seiner Kohlenstofffreiheit eine vielversprechende Alternative zu den konventionellen Kraftstoffen dar. Für den Einsatz in Verbrennungsmotoren ergeben sich Herausforderungen wie Verbrennungsanomalien in Form von Klopfen und dem Risiko von Glühzündungen an Hotspots im Brennraum. Weiterhin ist die Verbrennung zwar CO₂- und weitgehend schadstofffrei, jedoch verbleiben NO_x-Emissionen. All diese genannten Probleme lassen sich durch einen stark abgemagerten Betrieb eliminieren. Um in solchen Betriebsbereichen eine stabile Zündung zu gewährleisten, wird ein Zündungskonzept mit aktiver Vorkammer untersucht. Darüber hinaus hat Wasserstoff eine geringe volumetrische Energiedichte, sodass die Saugrohreinblasung durch starke Luftverdrängung zu Leistungsverlusten führt. Eine hier umgesetzte Direkteinblasung in den Brennraum hat demnach ein deutlich höheres Leistungspotential.

Beim Versuchsmotor handelt es sich um einen optisch zugänglichen Einzylinder-Forschungsmotor aus dem Nfz-Bereich (Tabelle 1).

Motordaten							
Bohrung x Hub	130 x 150 mm						
Hubvolumen	1,991						
Verdichtungsverhältnis	13						
Max. Drehzahl	2.000 1/min						
Max. Spitzendruck	200 bar						
Kolbenfenster	Ø 90 mm						

Versuchsbedingungen							
Motordrehzahl	700 1/min						
Ladedruck	0,25 bar (g)						
ZZP	10°KW v.OT						
SOI Hauptkammer	180°KW v.OT						
EOI Vorkammer	80°KW v.OT						
Gasdruck	10 bar						

Tabelle 1: Motordaten (links) und Versuchsbedingungen (rechts)

Mit einem optischen Messaufbau werden parallel Bilder von Schlieren und OH-Eigenleuchten mit Hochgeschwindigkeitskameras aufgenommen. Über einen Quarzglaseinsatz im Kolben lassen sich so die Vorgänge im Brennraum beobachten. Es werden verschiedene Vorkammergeometrien untersucht. Der DI-Wasserstoffinjektor ist seitlich im Zylinderkopf montiert und richtet den Gasstrahl über eine angewinkelte Blaskappe zentral in Richtung Zylinderachse.

2. Messergebnisse

Um erste Erkenntnisse über die Wasserstoffverbrennung mit aktiver Vorkammer zu gewinnen, wurden in einer ausgewählten Messmatrix die beiden wichtigsten Verbrennungsparameter variiert: das Luftverhältnis in der Vorkammer (λ_{VK} zwischen 2 und 3)

sowie im Brennraum bzw. der Hauptkammer (λ_{HK} zwischen 2 und 5). Die Bildauswertung erzeugt u.a. zyklusgemittelte Aufnahmen des Flammenfortschritts (Bild 1).



Bild 1: Schlierenauswertung für den Flammenfortschritt bei $\lambda_{VK} = \lambda_{HK} = 2$

Aus den Daten kann gezeigt werden, dass die Flammenfläche und Eindringtiefe der Fackelstrahlen bei magerem Hauptkammergemisch sinkt. Der Austrittswinkel wird tendenziell größer und die Austrittsgeschwindigkeit kleiner, was auf eine langsamere Verbrennung in der Vorkammer hindeutet. Der Einfluss des Vorkammer-Luftverhältnisses zeigt sich vor allem in den höheren Fackelgeschwindigkeiten bei fetteren Gemischen, was durch höhere Vorkammer-Differenzdrücke (pvk/pHK) validiert werden konnte.



Bild 2: λ_{VK} - λ_{HK} -Variation – Zündverzug (links) und charakteristische Umsatzpunkte im Brennverlauf (rechts)

Bild 2 zeigt den Zündverzug sowie die charakteristischen Umsatzpunkte im Brennverlauf. Es lässt sich eine deutliche Zunahme des Zündverzugs und verspätete Verbrennungsschwerpunktlage bei sowohl mageren Hauptkammer- wie auch Vorkammergemischen erkennen. Die Tendenz geht demnach klar zu einer fetteren Vorkammer, um auch sehr magere Brennraumgemische noch zuverlässig zu entzünden. Die Messung der NO_x-Emissionen zeigt dabei, dass der Magerbetrieb bis λ_{HK} = 2,5 mit nur bis zu 40 ppm fast stickoxidfrei gelingt. Dies ist nahezu unabhängig vom Vorkammer-Luftverhältnis, das bis auf λ_{VK} = 1,5 reduziert wurde. Zu fetteren Betriebspunkten in der Hauptkammer hin steigen die NO_x-Emissionen dann exponentiell an.

Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des Innovationslabores WaVe "Nachhaltige Wasserstoff-Verbrennungs-Konzepte", gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur aus Mitteln des Niedersächsischen Vorab. Die Wasserstoff-Forschung wird vom Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) koordiniert.

Simulationsbaukasten zur technoökonomischen Bewertung von PtX-Prozessen am Beispiel der Herstellung von Ammoniak als Schiffskraftstoff

Sebastian Braukhoff

122

1. Aufbau Power-to-X-Simulationsbaukasten

Um ebenfalls im Verkehrssektor die Klimaziele zu erreichen, ist neben dem Straßenverkehr auch die Schifffahrt zu defossilisieren, die rund 4 % der gesamten Treibhausgasemissionen der EU verursacht. Für zukünftige Schiffsantriebe wird neben Wasserstoff, Methanol oder synthetischem Diesel auch Ammoniak (NH₃) als potenzieller Kraftstoff in Betracht gezogen. Erste Schiffe mit Ammoniakantrieb befinden sich aktuell in der Erprobung. Ammoniak ist aber nicht nur als Kraftstoff, sondern auch als Wasserstoff-Transportmedium interessant, da es kostengünstig auch über weite Strecken und in großen Mengen über die Seewege transportiert werden kann.

Zur technologischen und wirtschaftlichen Bewertung wasserstoffbasierter Konversionsverfahren, wie der Ammoniakherstellung, wurde im Rahmen des Innovationslabors "H₂-Wegweiser Niedersachsen" ein flexibler und modularer Simulationsbaukasten auf Basis der OpenSource Prozesssimulationssoftware DWSIM entwickelt.

Das Tool bildet neben der Wasserstoffherstellung durch verschiedene Elektrolysetechnologien auch die CO₂- bzw. N₂-Bereitstellung, die Gaskompression und als Konversionsrouten die Methanisierung, Fischer-Tropsch-Synthese, Methanolherstellung und Ammoniakproduktion ab.

Die Prozess-Bausteine des Tools wurden vorkonfiguriert und können flexibel miteinander kombiniert werden. Anhand der vom Nutzer getroffenen Technologieauswahl wird das Prozessfließbild, welches die Grundlage für die Prozesssimulation bildet, automatisch generiert. Bild 1 zeigt das resultierende Fließbild für einen Beispielprozess aus PEM-Elektrolyse, Stickstoff-Abtrennung, Gaskompression und Ammoniak-Synthese.



Bild 1: Blockfließbild inkl. Simulationsausschnitt vom PtX-Prozess zur Ammoniak-Herstellung mit PEM Elektrolyse, Air Separation Unit, Druckmodul und Ammoniak-Synthese

Ziel des Simulationsbaukastens ist es, die Datengrundlage für die technoökonomische Bewertung von Wasserstoff-Konversionsverfahren zur Verfügung zu stellen. Diese können dann auch als Basis für die ökologische Bewertung der Verfahren, z. B. im Rahmen einer LCA, dienen.

2. Technoökonomische Bewertung der Ammoniakherstellung

Bei der Kostenbestimmung sind neben den Betriebs- auch die Kapitalkosten der Anlagen zu berücksichtigen. Diese skalieren mit der Anlagengröße, allerdings sind die Zusammenhänge i.d.R. nichtlinear und werden durch weitere Faktoren wie Konstruktionsprinzip, Materialauswahl, Druckniveau etc. maßgeblich beeinflusst.

Im Simulationsbaukasten erfolgt die Dimensionierung der Komponenten auf Basis der Elektrolysekapazität. Für alle Module sind neben den technologischen Daten auch größenabhängige Daten zu den Kapitalkosten hinterlegt, so dass die wirtschaftliche Bewertung simultan zur technischen Analyse erfolgt.

Die Gesamteffizienz der Prozesskette wird maßgeblich auch durch das Ausmaß der Wärmeintegration bestimmt. Die interne Nutzung von Abwärmeströmen reduziert zwar den externen Energiebedarf, und damit die Betriebskosten der Anlage, erhöht aber gleichzeitig die Kapitalkosten. Bild 2 zeigt die mit dem Simulationsbaukasten ermittelte Verteilung der Investitionskosten für die benötigten Wärmeübertrager auf die Prozessmodule der Ammoniakkette in Abhängigkeit von der installierten Elektrolyseleistung.



Bild 2: Aufteilung der Investitionskosten für die Wärmeübertrager auf die Prozessmodule in Abhängigkeit der Elektrolyseleistung

Die Daten zeigen, dass die Module unterschiedlich mit der Elektrolyseleistung skalieren. Während bei Elektrolyseleistungen bis ca. 50 MW die Wärmeübertrager für die Stickstoff-Bereitstellung den Großteil der Equipmentkosten ausmachen, verschiebt sich die Verteilung bei hohen Elektrolyseurkapazitäten in Richtung des Wasserelektrolyse- und des Synthesemoduls. Das Poster stellt weitere technoökonomische Analysen und Ergebnisse aus der Nutzung des Simulationsbaukastens am Beispiel der Ammoniaksynthese vor.

Jessica Dymke

1. Motivation

Ammoniak (NH₃) enthält keinen Kohlenstoff und kann daher künftig zur Dekarbonisierung von Verbrennungsprozessen im Kontext der Klimawende beitragen. Seine volumetrische Energiedichte ist höher als die von Wasserstoff (H₂) und eine nutzbare Infrastruktur existiert bereits. Verglichen mit herkömmlichen Kraftstoffen werden für die Zündung von NH₃/Luft-Gemischen wesentlich höhere Energien benötigt und die Verbrennungsgeschwindigkeiten sind niedrig. Durch die Zugabe von reaktiveren Brennstoffen können diese Eigenschaften jedoch modifiziert werden, und die Nutzung von NH₃ kann auf weitere technische Anwendungen ausgeweitet werden [1]. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss des H₂-Anteils im Brennstoffgemisch mit NH₃ auf die zur Zündung notwendige kapazitive Entladungsenergie, den zeitlichen Druckverlauf sowie die Frühphase der Ausbreitung des heißen Gaskerns.

2. Material und Methoden

Die Gasgemische werden mittels Partialdruckmethode bereitet und der Anteil von H₂ zu NH₃ variiert. Das Äquivalenzverhältnis φ wird gemäß dem zündwilligsten Gemisch von NH₃/Luft [2] mit φ = 0,9 ± 0,2 % konstant gehalten. Anschließend werden sie in einem Gefäß mit einem sphärischen inneren Volumen von 0,5 L durch kapazitive Entladungen verschiedener Energien gezündet. Der Druck vor der Zündung beträgt *p* = (1,02 ± 0,07) bar. Es werden Wolframelektroden mit einem Kugeldurchmesser von 5 mm verwendet und der Elektrodenabstand auf 4 mm ± 3 µm eingestellt und konstant gehalten. Die Bestimmung der Entladungsenergie erfolgt anhand folgender Formel [2], wobei anzumerken ist, dass dieser Ansatz keine Verluste berücksichtigt und die tatsächlich im Funken umgesetzte Energie niedriger ist:

W: Entladungsenergie
C: Kapazität $W = \frac{1}{2}CU^2$ (1)U: Durchschlagsspannung

Die optische Visualisierung der Zündfunken und die darauffolgenden Ausbreitungen der heißen Gaskerne im Frühstadium erfolgt mithilfe eines Schlieren-Aufbaus.

3. Ergebnisse

In Bild 1 (A) ist zu sehen, dass schon ein geringer Anteil an H₂ im Brennstoffgemisch (α_{H_2}) die zur Zündung notwendige Entladungsenergie deutlich herabsetzt. In Bildabschnitt (B) sind die Druckkurven der Zündversuche dargestellt. Die Maximaldrücke sowie der zeitliche Druckanstieg steigen mit zunehmendem α_{H_2} .



Bild 1: Zündenergien (A) und Druckverläufe (B) in Abhängigkeit von α_{H_2} (max. abs. einfache Messunsicherheit $\Delta p = \pm 0.23$ bar, ΔW zu gering zur Darstellung)

Die in Tabelle 1 abgebildeten Schlierenserien zeigen die Frühphase der Ausbreitung der heißen Gaskerne. Für geringe α_{H_2} werden hohe Entladungsenergien zur Zündung benötigt und die induzierte Strömung dominiert die Frühphase der Flammenausbreitung. Es bildet sich eine Torusgeometrie aus. Für $\alpha_{H_2} = 0,099$ und entsprechend niedrigere Zündenergie ist das Auftriebsverhalten des heißen Gaskerns sichtbar. Für $\alpha_{H_2} = 0,200$ dominiert hingegen die Verbrennung die frühe Flammenausbreitung.



$T abelie T. Ochinerensenen (\Delta t = \pm T 0, T \mu 3$	Tabelle	1: Schlierenserien	$(\Delta t = \pm)$	16,7	μs)
---	---------	--------------------	--------------------	------	----	---

Literatur

- Valera-Medina, A., et al., Review on Ammonia as a Potential Fuel: From Synthesis to Economics, Energy Fuels, 2021, 35, 6964–7029
- [2] Hattwig, M., Steen, H., Handbook of explosion prevention and protection, Wiley-VCH, Weinheim, 2004

Lukas Heinz

1. Abstract

Während elektromotorische Antriebe bei neuzugelassenen Fahrzeugen in Deutschland zunehmend an Bedeutung gewinnen, sind Ottomotoren mit 62 % weiterhin die Hauptantriebsquelle in der Bestandsflotte [1]. Um den CO₂-Ausstoß dieser bereits bestehenden und auch zukünftiger Fahrzeuge zu reduzieren, sind teilweise oder vollständig regenerative Kraftstoffe notwendig. Durch Substitution fossiler Bestandteile wird der Verbrennungsprozess durch ein verändertes Verdampfungs- und Pyrolyseverhalten verändert, wodurch die Entstehung gasförmiger und fester Schadstoffe beeinflusst wird. Ziel der Untersuchung ist es, das Zusammenspiel einzelner Kraftstoffkomponenten oder Komponentengruppen mit transientem Motorbetrieb zu analysieren, um die Entwicklung eines rußarmen Drop-In-Kraftstoffes zu ermöglichen

2. Versuchsdurchführung

Im Rahmen der Forschungstätigkeit wurden 13 ausgewählte Kraftstoffblends an einem hochdynamischen Transientenprüfstand getestet. Hierzu wurde mit einem Serienottomotor ein Zyklus aus realen Fahrdaten mit gleichen zeitlichen Anteilen der Stadt-, Land- und Überlandfahrt unter konstanten Bedingungen wiederholt. Eine Übersicht der Kraftstoffe ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Kraftstoffmatrix umfasst Drop-In-Kandidaten, sowie Blends auf Basis stark- (High) und schwachrußender (Low) Basiskraftstoffe.

Bezeichnung	T10	T50	T90	FBP	Alkohole	Aromaten	Aromaten >C7	Olefine
	°C	°C	°C	°C	vol%	vol%	vol%	vol%
Base High	62.3	101.7	174.4	230.5	0.0	37.4	24.7	21.0
Base Low	55.9	82.5	111.9	182.9	0.3	0.7	0.7	0.3
E10 High	56.2	90.0	171.2	223.1	10.0	33.7	22.3	19.1
E20 High	57.9	71.9	168.6	216.4	19.7	29.9	19.8	17.1
E30 High	58.4	72.9	165.0	215.6	29.4	26.2	17.3	15.2
M5 High	47.7	103.9	172.2	223.1	5.2	34.6	30.9	18.5
M15 High	49.6	86.9	171.7	226.2	14.8	33.2	29.6	15.8
T5 High	64.0	102.7	172.5	225.3	0.0	40.1	23.7	20.3
T10 High	65.3	103.6	171.2	220.5	0.0	43.5	22.3	19.2
T10 Low	59.6	87.0	111.1	183.5	0.3	8.3	0.6	0.3
G33	56.7	97.4	153.7	184.0	8.5	24.6	17.4	7.1
G85	54.1	101.1	178.3	196.9	0.0	34.6	19.1	5.8
EU5 Cert	66.7	105.6	145.3	165.3	5.0	32.4	19.3	1.3

Tabelle 1: Kraftstoffübersicht

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Zur Bewertung der Partikelemission wurde das Rohabgas nach Turbolader entnommen und die Größenverteilung mittels eines Partikelspektrometers des Typs DMS500 bestimmt und der über dem Prüflauf kumulierte Partikelausstoß berechnet. Um die bei Transientprüfläufen typische Streuung der gemessenen Partikelkonzentration zu minimieren, wurde der Test für jeden Kraftstoff fünffach wiederholt und die Ergebnisse gemittelt.

3. Ergebnisse

In Abbildung 1 sind die kumulierten PM- und PN-Emissionen der verschiedenen Blends gegenübergestellt. Hierbei bildet der nahezu aromatenfreie Base-Low-Kraftstoff die untere, und der spätsiedende Base-High-Kraftstoff die obere Referenz.

Während insbesondere der Anteil schwersiedender Aromaten bei den Base-High basierten Blends im Vergleich zum Zertifizierungskraftstoff zu einem erhöhten Partikelausstoß führt, zeigt eine Beimischung des C7-Aromaten zum Base-Low Kraftstoff nur einen geringen Einfluss. Die Beimischung von bis zu 30 % Ethanol führt im Vergleich zum Base High zu einer deutlichen Reduktion von Partikelanzahl und -masse. Beim Methanol hingegen wird ein gegensätzlicher Effekt beobachtet, welcher durch eine verzögerte Verdampfung der schwersiedenden Komponenten bedingt durch die hohe Verdampfungsenthalpie des Methanols erklärt werden kann [2].

Durch Einsatz der beiden Drop-In Kandidaten lässt sich der PN10-Ausstoß um 24 % (G33) und 37 % (G85) im Vergleich zum Zertifizierungskraftstoff reduzieren.



Abbildung 1: Kumulierte Partikelemissionen der Kraftstoffe nach Zyklusabschnitten

Literatur

- Kraftfahrtbundesamt, Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken, 1. Januar 2023 (FZ1), (2023). https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Motorisierung/motorisierun g_node.html;jsessionid=08D7BFCE8911BE239B233B3ADF0DE2B3.live21323 (abgerufen: 24.03.2024).
- [2] S.C. Burke, M. Ratcliff, R. McCormick, R. Rhoads, B. Windom, Distillationbased Droplet Modeling of Non-Ideal Oxygenated Gasoline Blends: Investigating the Role of Droplet Evaporation on PM Emissions, SAE Int. J. Fuels Lubr. 10 (2017) 69–81. https://doi.org/10.4271/2017-01-0581.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. Jacqueline Höltkemeier-Horstmann

1. Motivation

Angesichts des Klimawandels und der strengen Beschränkungen der Treibhausgasemissionen ist es erforderlich. Verbrennungsprozesse weiterzuentwickeln und zu optimieren. Wasserstoff ist dabei ein attraktiver Energieträger für künftige Anwendungen wie Schwerlastmotoren und Langstrecken-LKW [1], da bei seiner Verbrennung keine Kohlenstoffdioxidemissionen entstehen. Ein Nachteil der Wasserstoff-Verbrennung sind die hohen thermischen Stichoxidemissionen aufgrund der hohen adiabatischen Flammentemperatur. Um diese zu reduzieren, ist eine Senkung der Flammentemperatur notwendig, zum Beispiel durch Abgasrückführung, Wassereinspritzung oder die Verwendung magerer Gemische. Bei hohen Luft-Brennstoff-Äquivalenzverhältnissen (λ >3) wird jedoch mehr Energie zur Zündung des Gemisches benötigt, außerdem nimmt die laminare Flammengeschwindigkeit ab, was in einer geringeren Verbrennungseffizienz resultiert. Mit der turbulenten heißen Freistrahlzündung (turbulent hot iet ignition: THJI) können beide Probleme gelöst werden [2]. Hierbei wird in einer kleinen Vorkammer ein stöchiometrisches oder nahezu stöchiometrisches Gemisch durch eine Zündkerze gezündet. Über eine oder mehrere verbindende Düsen gelangen heiße Abgasfreistrahlen in die Hauptkammer und können hier eine großvolumige Zündung auslösen, die zu einer schnelleren Verbrennung führt [3].

In dieser Arbeit werden verschiedene Einflussparameter auf die THJI charakterisiert, um das Verständnis der Zündprozesse zu verbessern.

2. Experimentelle Methodik

Zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Parameter, wie Düsendurchmesser und -Geometrie, Gemischzusammensetzung, Temperatur und Druck, auf die turbulente heiße Freistrahlzündung werden Druckmessungen in Vor- und Hauptkammer vorgenommen sowie ein simultanes Schlieren- und ein OH-LIF-System mit Aufnahmeraten im Hochgeschwindigkeitsbereich aufgebaut. Die Schlieren dienen zur Visualisierung der Zündung und anschließenden Flammenausbreitung. Mittels der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) an OH-Radikalen können Informationen über den Zündort, die Flammenfront, das Zündverhalten sowie über die zeitliche Entwicklung gewonnen werden. Die Ergebnisse der Druckmessungen werden mit Ergebnissen aus Experimenten mit Funkenzündung verglichen. Dabei werden vier Parameter evaluiert: Der Maximaldruck, der mit Simulationen verglichen wird und damit eine Aussage über die Verbesserung der Effizienz der Verbrennung erlaubt, die mittlere und maximale Druckanstiegsrate als Maß für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Verbrennungsreaktion und schließlich der Zeitpunkt des Druckmaximums als zusätzlicher Parameter, da dieser die Verbesserung durch die THJI eindrücklicher zeigt.



3. Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Verbesserung der Verbrennungsgeschwindigkeit durch die THJI im Vergleich zur Funkenzündung. Für verschiedene Kombinationen aus Düsendurchmesser, Gemischzusammensetzung in der Vorkammer und Anzahl der Düsenöffnungen wurden Zündgrenzen ermittelt. Mit Erhöhung des Düsendurchmessers und Erhöhung des H₂-Anteils in der Vorkammer wurden die Zündgrenzen erheblich zu mageren Hauptkammer-Gemischen verschoben, die Zündfähigkeit nimmt also zu. Die Auswertung der Druckkurven ergab außerdem eine signifikante Verbesserung durch die THJI hinsichtlich des maximal erreichten Druckes sowie der Druckanstiegsrate und damit der gesamten Verbrennungsreaktion. Exemplarische Schlieren-Serien für unterschiedlich viele Düsenöffnungen sind in Bild 1 gezeigt. Sie zeigen verschiedene Entwicklungsstadien des Freistrahls und den Zündprozess.

Zukünftig wird das Hochgeschwindigkeits-OH-LIF-System in den Aufbau integriert werden, um Zündort und -zeitpunkt genauer ermitteln und die Flammenausbreitung charakterisieren zu können.



Bild 1: Einfluss der Anzahl von Düsenöffnungen N auf die turbulente heiße Freistrahlzündung anhand von Schlieren-Aufnahmen. Alle Bilder wurden mit Luft-Brennstoff-Äquivalenzverhältnissen von $\lambda_{PC} = 1,0$ (Vorkammer) und $\lambda_{MC} = 2,4$ (Hauptkammer) sowie einem Düsendurchmesser von d = 1,2 mm aufgenommen.

Literatur

- [1] A. Onorati et al., The role of hydrogen for future internal combustion engines, International J of Engine Research **23(4)**, 529-540 (2022).
- [2] S. Biswas and L. Qiao, Ignition of ultra-lean premixed H₂/air using multiple hot turbulent jets generated by pre-chamber combustion, *Applied Thermal Engineering* **132**, 102-114 (2018).
- [3] J. Hua et al., Influence of pre-chamber structure and injection parameters on engine performance and combustion characteristics in a turbulent jet ignition (TJI) engine, *Fuel* 283, 119236 (2021).

Svenja Iserloth

1. Relevanz des Vorhabens

Der Straßenverkehr war im Jahr 2020 für 24 % der gesamten CO₂-Emissionen in der EU verantwortlich [1]. Im Sinne der Nachhaltigkeit sollten Kraftstoffe idealerweise auf der Basis von organischen und chemischen Reststoffen hergestellt werden, um die Emissionen deutlich zu reduzieren und nicht mit Lebensmitteln zu konkurrieren. Dieses Verfahren bietet eine Lösung zur Bewältigung dieser Herausforderung, da organische Abfallstoffe wie Altspeiseöle (Used Cooking Oils, UCO) und chemischen Reststoffe in Kraftstoff und Energiespeicher umgewandelt werden und die Kreislaufwirtschaft geschlossen wird.

2. Forschungsinhalt

2.1 Der Prozess



Bild 1: Schematischer Aufbau der Laboranlage

Im Rahmen dieser Dissertation werden Kohlenwasserstoffgemische aus dem READi-Verfahren (READi = Reactive Distillation) veredelt. Dabei handelt es sich um eine thermochemische Solvolyse, bei der durch Cracking und Destillation triglyceridhaltige Gemische und Polymere in Kohlenwasserstoffe mit definierter Kettenlänge umgewandelt werden. Diese werden anschließend in der zweiten Stufe in einem Festbett-Rohrreaktor katalytisch hydriert, also mit Wasserstoff behandelt und isomerisiert (Bild 1). Als Katalysatoren kommen hauptsächlich Zeolithe mit Nickel- oder Edelmetallbeladung zum Einsatz, z.B.

NiMo auf Al₂O₃. Die Reaktionsbedingungen liegen bei 50 bis 100 bar Wasserstoffpartialdruck und Temperaturen zwischen 260 bis 320 °C.

2.2 Chemischer Hintergrund

Im Reaktor fließen das Bioöl und der Wasserstoff an die Außenfläche des Katalysators, wo sie in die Poren transportiert und an der Innenfläche der aktiven Zentren adsorbiert werden. Hier findet die chemische Reaktion statt. Das Produkt wird anschließend von der Katalysatoroberfläche desorbiert [2].

Hauptreaktionspfade bei der Wasserstoffbehandlung sind die Hydrierreaktion sowie die Hydrodesoxygenierung mit dem Ziel der Elimination des Restsauerstoffs (Bild 2). Die anschließende Isomerisierung bewirkt eine Umstrukturierung des Moleküls mit dem Ziel der Verbesserung der Kältestabilität des Produkts. Die wichtigsten Einflussparameter auf das Endprodukt sind der Katalysator, der Druck, die Temperatur und die WHSV (Weight hourly space velocity), die Kontaktzeit zwischen Katalysator und Produkt.



Bild 2: Links: schematische Hydrierreaktion von Alkenen, rechts: schematische Isomerisierreaktion von Alkanen [3]

Das Ergebnis dieses Verfahrens ist ein Energieträger, welcher unter anderem als Kraftstoff nach DIN EN 590 und/oder DIN EN 15940 eingesetzt werden kann.

3. Forschungsdesign und Ergebnisse

Im ersten Schritt wird ein Katalysatorscreening mit verschiedenen geeigneten Edelmetallkatalysatoren durchgeführt. Anschließend werden Folgeversuche mit einem teilfak-



Bild 3: Isomerisierte HCVO-Diesel-Probe

toriellen Design of Experiments durchgeführt, um ein optimales Produkt mit hoher Ausbeute für verschiedene Anwendungen produzieren zu können.

Marker zur Feststellung der Ergebnisse für die Hydrierung sind die Lagerstabilität, Energiedichte und die Elimination von Heteroatomen. Für die Isomerisierung sind Cloud Point (CP), Cold Filter Plugging Point (CFPP), die Katalysatoreffizienz sowie die technische und wirtschaftliche Machbarkeit die Erfolgskontrollparameter. Erste Ergebnisse zeigen eine signifikante Verbesserung dieser Produkteigenschaften für Bioöle (Bild 3). Bezogen auf die genannten Kraftstoffnormen werden alle Zielwerte erreicht. Aktuell werden Folgeversuche durchgeführt und Produkte aus dem chemischen Recycling untersucht.

Literatur

- European Commission, "Road transport: Reducing CO₂ emissions from vehicles," 24 04 2024. [Online]. Available: https://acesse.dev/DOpjS.
- [2] A. A. Shaikh, Heterogeneous Catalysis: Essentials for Chemical Engineers, De Gruyter, 2020.
- [3] J. Buddrus, Grundlagen der Organischen Chemie, Berlin: De Gruyter, 2011.

Ignition delay time and multi-speciation measurements of ammonia/methanol mixtures in a shock tube

Nafi Farzana

1. Introduction

The study into the ignition delay times of ammonia/methanol (NH₃/CH₃OH) mixtures represents a continuation of research focused on utilizing ammonia as an energy carrier. The positive effect of ammonia is a carbon-free fuel derived from sustainable energy sources and its ability to be stored efficiently. A suitable addition to improve ammonia combustion performance is methanol, which is known for its combustion properties. The interest in this investigation is from the potential of this mixture to be used as a carbon-neutral fuel source because they only emit nitrogen and water upon combustion. Accurately predicting ignition delay is essential for unlocking the full potential of ammonia-methanol mixtures as environmentally friendly fuel alternatives. In this work, the combustion properties of NH₃/CH₃OH have been investigated to develop a kinetic model under the studied temperatures and pressures [1, 2].

2. Experimental Approach

The experiment described here was conducted using a high-pressure shock tube (HPST) setup to systematically study different conditions and understand the combustion processes. The investigation undergoes a wide range of conditions, including an equivalence ratio of 1.0 by varying concentrations of methanol (5%, 10%, and 20%), with temperatures ranging from 1500 to 2200 K and pressures varying between 2 and 4 bars. The diagnostic measurements involved the utilization of laser-based techniques for probing specific molecular species within the reaction environment. Timeresolved concentration profiles of three distinct species, nitric oxide (NO), carbon monoxide (CO), and NH₃, were determined utilizing a Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) configuration. A fixed-wavelength absorption spectroscopy method was employed to achieve a heightened temporal resolution. Detection of NO (at 1915.76 cm⁻¹) and CO (at 2059.91 cm⁻¹) involved the utilization of two interband cascade lasers (ICL), while NH₃ (at 1084.6 cm⁻¹) detection necessitated the application of a quantum cascade laser (QCL). Table 1 explains the mole fraction of the studied mixture. This comprehensive approach facilitated a thorough investigation into the combustion phenomena.

3. Results

The results shown in Figure 1A illustrate that adding methanol increases ammonia's chemical reactivity, which supports findings from previous studies, by Mingfei Lu et al. [3] The data shows that the IDT may significantly decrease with a small amount of methanol in the fuel mixture. Consequently, among the tested mixtures, Mixture 3 ex-

hibits the shortest IDT. Figure 1B represents the experimental data illustrating the relationship between pressure and the formation of CO, NO, and NH₃ during the combustion process. The results show a clear dependency of CO, NO, and NH₃ formation on pressure variations.

Mixture	Components	CH₃OH	NH₃	Ar	O ₂	Phi	Temperature (K)	Pressure (bar)
1	CH ₃ OH/NH ₃ /Ar/O ₂	0.0028	0.0531	0.9	0.044	1.0	1559-2069	2.36-2.83
2	CH ₃ OH/NH ₃ /Ar/O ₂	0.0055	0.0493	0.9	0.045	1.0	1561-2110	2.44-3.04
3	CH ₃ OH/NH ₃ /Ar/O ₂	0.0105	0.0421	0.9	0.048	1.0	1372-2058	2.37-2.63

Table 1: CH₃OH/NH₃/Ar/O₂ mixture compositions

Note: Argon is employed as an inert diluent to adjust the total pressure of the mixture without altering the chemical kinetics of the reactions and also to adjust the stoichiometry of the mixture.



Figure 1: A: IDTs of the NH₃/CH₃OH mixture were measured in the shock tube at ϕ = 1.0. B: Pressure Traces and Formation of CO, NO, and NH₃ over time

Literature

- [1] Wei, F., Lu, M., Long, W., Dong, D., Dong, P., Xiao, G., Tian, J., Tian, H., & Wang, P. (2023, November). Optical experiment study on Ammonia/Methanol mixture combustion performance induced by methanol jet ignition in a constant volume combustion bomb. Fuel, 352, 129090. <u>https://doi.org/10.1016/i.fuel.2023.12909</u>
- [2] Li, L., & Hurley, J. A. (2007). Ammonia-based hydrogen source for fuel cell applications. International Journal of Hydrogen Energy, 32(1), 6-10. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.014.
- [3] Lu, M., Dong, D., Wei, F., Long, W., Wang, Y., Cong, L., Dong, P., Tian, H., & Wang, P. (2023). Chemical mechanism of ammonia-methanol combustion and chemical reaction kinetics analysis for different methanol blends. Fuel, 341, 127697. <u>https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127697</u>

Zündversuche mit Wasserstoff unter hohem Druck bei Betrachtung des OH-Eigenleuchtens mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera

Leopold Seifert

1. Motivation

Zur Senkung der Kohlendioxidemissionen des Energie- und Transportsektors ist die Verwendung von Wasserstoff anstelle von Erdgas eine effektive Maßnahme. Für einen sicheren Betrieb mit reinem Wasserstoff oder hohen Anteilen im Kraftstoffmix sind derzeitige Verbrennungstechnologien aufgrund möglicher Flashbacks und Vorzündungen in Bezug auf den Wasserstoffgehalt begrenzt. Daher sind weitere Studien von Wasserstoff erforderlich, um das Verhalten des Kraftstoffs bei motorrelevanten Bedingungen (mager bis stöchiometrisch) zu verstehen, was Messungen unter hohem Druck erfordert.

2. Methoden



Bild 1: Versuchsaufbau mit optischem Zugang

Eine Rapid Compression Machine (kurz: RCM) wurde verwendet, um die Zündeigenschaften von Wasserstoff bei einem Druck von 20 bar zu untersuchen. Es wurde ein Temperaturbereich von 950-1040 K nach der Kompression realisiert, um einen Zündverzug im Bereich von 1-100 ms abzudecken. Messdaten wurden für 3 verschiedene Äquivalenzverhältnisse von mageren bis hin zu stöchiometrischen Bedingungen ($\varphi = 0.33, 0.5, 1.0$) gesammelt. Für eine begrenzte Anzahl von Bedingungen wurde die Hochgeschwindigkeits-Bildgebungstechnik eingesetzt, um den dynamischen Zündvorgang zu visualisieren. Ein UV-Quarzglas wurde in den Reaktorkopf eingesetzt, so dass eine bildverstärkende CMOS-Kamera (Phantom v2640 mit LaVision High-Speed IRO) im Inneren der Reaktionskammer fokussiert werden konnte. Die Auflösung des CMOS-Sensors wurde auf 512 x 512 Pixel reduziert, um eine Aufnahmefrequenz von 50 kHz zu erreichen.



3. Ergebnisse

Mit zunehmender Verdichtungstemperatur des Kraftstoffgemischs verringert sich der Zündverzug, entsprechend dem in der Literatur beobachteten Arrhenius-Verhalten. Die Auswirkung des Äquivalenzverhältnisses auf den Zündverzug wird in den Experimenten und Simulationen gut erfasst. Mit dem beschriebenen Kameraaufbau wird die Chemilumineszenz der OH*-Radikale, die sich während des Zündvorgangs bilden, und die Flammenausbreitung innerhalb des Reaktors parallel zur Fenster-Ausrichtung sichtbar. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Zündung immer im oberen Bereich der Reaktionskammer beginnt und sich dann nach innen ausbreitet, wobei das Restgas in der unteren Hälfte des Reaktors komprimiert wird. Dieses erhitzte Gas führt dann zu einem beschleunigten Aufbau von Radikalen, was zu einem explosiven Modus führt, der starke Druckwellen im Inneren des Reaktors erzeugt, die anhand des dynamischen Drucksignals zu sehen sind (siehe Bild 2).



Bild 2: Bildsequenz des Zündvorgangs mit Darstellung der Flammenfront und das dazugehörige Druck- und OH-Signal für phi = 0.33 bei 20 bar

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die gemessenen Zündverzugszeiten für ein Äquivalenzverhältnis von 0.5 stimmen gut mit Literaturdaten von Kéromnès et al. überein [1]. Das kinetische Modell [1] zeigt eine gute Übereinstimmung mit beiden Datensätzen. Zum ersten Mal ist die Hochgeschwindigkeits-OH-Chemilumineszenz der Wasserstoffzündung in einer RCM untersucht worden. Zwei verschiedene Verbrennungsmodi, ein langsamer und ein schneller, konnten während der Verbrennung sichtbar gemacht werden. Diese Beobachtung deckt sich mit den verbrennungstheoretischen Arbeiten zu Wasserstoff-Luft-Gemischen von Dimitris et al. [2]. Diese Arbeit wird in Zukunft mit einer unterstützenden CFD-Studie gekoppelt, um diese Verbrennungsmodi in einem solchen Reaktor zu verstehen. Weitere Experimente werden in den kommenden Monaten durchgeführt.

Literatur

- [1] A. Kéromnès et al., Combust. Flame, vol. 160, no. 6, pp. 995–1011, 2013
- [2] D. J. Diamantis et al., Combust. Theory Model., vol. 19, no. 3, pp. 382-433, 2015

Investigation into the oxidation behavior of tetrahydrofuran and isopropanol blends

Meenu Sharma, Guanyu Wang

1. Introduction

136

To reach sustainable and energy-efficient aviation, transitioning from conventional fossil fuels to renewable energies becomes imperative. Liquid energy carriers in combustion-based propulsion systems play a crucial role, with e-fuels emerging as a promising strategy to achieve high energy density and carbon-neutral aviation. Nevertheless, challenges in reducing non-CO₂ emissions, including carbon monoxide (CO), soot, and NOx, still exist. This has prompted a concentrated investigation into lean pre-vaporization premix (LPP) combustion [1]. This study focuses on investigations into the oxidation behaviour of a composite e-fuels blend consisting of tetrahydrofuran (THF) (C4H_8O) and isopropanol (iC₃H₈O), specifically under lean combustion conditions.

2. Experimental Approach

Shock tube experiments were conducted across various conditions to understand the high-temperature oxidation. These experiments encompassed an equivalence ratio of 0.9 and temperatures (1274 to 1791 K) at an average pressure of 1.48 bar. By Employing Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), we measured the key species, such as CO and water vapor, during the ignition process to get insights into the combustion chemistry.

Mixture	C_4H_8O	C ₃ H ₈ O	O ₂	He	Ar	φ	T₅/K	P₅/bar	Facility
1	1.40	0.00	8.60	20	70	0.9	1319-1644	1.71-1.35	ST
2	0.00	1.67	8.33	20	70	0.9	1274-1696	1.56-1.45	ST
3	1.16	0.29	8.55	20	70	0.9	1305-1791	1.53-1.30	ST
4	1.03	0.45	8.52	20	70	0.9	1280-1575	1.48-1.27	ST
5	0.90	0.60	8.50	20	70	0.9	1308-1616	1.54-1.32	ST
6	0.76	0.76	8.47	20	70	0.9	1309-1614	1.55-1.32	ST
7	1.08	0.00	11.91	0	87	0.5	520-1100	1	JSR
8	0.00	1.30	11.7	0	87	0.5	700-1180	1	JSR
9	0.5	0.5	11.81	0	87	0.5	500-1180	1	JSR

Table 1: Compositions (% mole fraction) of mixtures and experimental conditions

To understand the low-temperature oxidation of these fuel blends, a jet-stirred reactor (JSR) coupled with a Time-of-Flight mass spectrometer (ToF-MS) was utilized. Operating under intermediate temperatures (500 – 1200 K), 1 bar pressure, and lean fuel ($\varphi = 0.5$) concentration conditions, key intermediates and products in fuel conversion were analyzed. The measured experimental data can serve as reference data for validating and refining detailed reaction kinetic mechanisms in the future. Additionally, to enhance the reliability of our data, we conducted uncertainty analyses for species concentration with temperature variations.



3. Results

In the shock tube study, the CO formation is temperature dependent. The maximum CO mole fraction decreases when the temperature is below 1300 K. Our previously developed alcohol mechanism [2] was integrated with Fenard's [3] mechanism, initially created for THF, to make a universal and comprehensive mechanism suitable for THF/isopropanol mixtures.

In the JSR-ToF-MS study, the temperature-dependent oxidation of isopropanol, THF, and their blends was investigated. As individuals, THF consumption occurs between 560 K and 1000 K, featuring a Negative Temperature Coefficient (NTC) zone between 560 K and 690 K, whereas isopropanol consumption is observed from 760 K to 1060 K. However, in the mixture, both fuels are consumed at relatively the same temperature range from 760K to 1060K. Figure 1(b) illustrates their concentration variation with temperature and CO, CO₂, and H₂O emissions. The mole fraction uncertainties were determined to be \pm 58% for CO, \pm 24% for CO₂, \pm 24% for H₂O, and \pm 36% for fuel, respectively. The temperature uncertainty was within the range of \pm 1.5% to \pm 2.5%. Similar to the shock tube study, the mechanism mentioned above was utilized to simulate the oxidation process in the JSR-TOF-MS study. This model adequately captured the fuel, CO₂, and H₂O species profiles, although it slightly overpredicted the CO profile.



Figure 1: A: Comparisons of experimental and predicted IDTs (Uncertainty: ± 20%) (a) Mixture 3; (b) Mixture 4; (c) Mixture 5; (d) Mixture 6.

B: Mole fraction profiles of Isopropanol and THF and their products species CO, CO₂, and H₂O. (a) Mixture 7 and Mixture 8; (b) their products species CO, CO₂, and H₂O (c) Mixture 9 (d) products species CO, CO₂ and H₂O.

Literature

- [1] Brehm et al./ISABE 99-7163, 1999 from R. Fink, Diss TU-München 2001.
- [2] Nadiri, S., et al. (2021). Kinetic modeling study on the combustion characterization of synthetic C3 and C4 alcohols for lean premixed prevaporized combustion. Energies, 14(17), 5473.
- [3] Yann Fenard et al., A model of tetrahydrofuran low-temperature oxidation based on theoretically calculated rate constants, Combustion and Flame 191 (2018) 252–269.



Autoren und Autorinnen dieses Bandes

Dr. Marko Babic, Robert Bosch GmbH, Stuttgart

Dieter Bockey, Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP), Berlin

Dr. Marcus Bollig, Verband der Automobilindustrie (VDA), Berlin

Philipp Borken, M.Sc., Universität Hannover

Sebastian Braukhoff, M.Sc., TU Clausthal, CUTEC Forschungszentrum, Clausthal

Dr. Andreas Broda, MAN Truck & Bus SE, Nürnberg

Dr. Stefan Buhl, MAN Truck & Bus SE, Nürnberg

Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker, Universität Hannover

Jessica Dymke, M.Sc., Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Prof. Dr. Michael Faulde, Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe, Erding

Prof. Dr.-Ing. Alexander Gelner, MBA, Technische Hochschule Ingolstadt

Dipl.-Ing. Kevin Günther, eFuel GmbH, Hoya

Dr.-Ing. Hauke Hansen, Universität Hannover

Lukas Heinz, M.Sc., Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Jacqueline Höltkemeier-Horstmann, M.Sc., Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Dipl.-Ing. Dominic Hyna, MAN Truck & Bus SE, Nürnberg

Yasin Incedag, M.Sc., Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Hamburg

Svenja Iserloth, M.Sc., Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Dr. Lorenz Kiene, Christian Lühmann GmbH, eFuels Forum GmbH, eFuel GmbH, Hoya

Prof. Dr.-Ing. Georg Klepp, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo

Alexander Knafl, PhD., MAN Energy Solutions SE, Augsburg

Dr.-Ing. Hanno Krämer, Audi AG, Ingolstadt

Dipl.-Ing. Christian Kunkel, MAN Energy Solutions SE, Augsburg

Dipl.-Ing. Andreas Kurtz, Bundesministerium des Innern und für Heimat, Berlin

Mario Lichtenberg, M.Eng., Deutsche Bahn AG, Berlin

Dipl.-Ing. Florian Lindner, MAN Truck & Bus SE, Nürnberg

Max Linier, M.Sc., Deutsche Bahn AG, Frankfurt

Lukas Link, M.Sc., Universität Hannover

Dipl.-Ing. Sascha Micklich, MBA, Bundesministerium des Innern und für Heimat, Berlin

Nafi Farzana, M.Sc., Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Tancrède Oswald, M.Sc., Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Dr. Stephan Schraml, MAN Truck & Bus SE, Nürnberg

Leopold Seifert, M.Sc., Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Meenu Sharma, M.Sc., Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Dipl.-Ing. Arne Philipp Siemens, Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG, Rutesheim

Prof. Dr. Anika Sievers, Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Hamburg

Dipl.-Ing. Daniel Teubner, MAN Truck & Bus SE, Nürnberg

Guanyu Wang, M.Sc., Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Dipl.-Ing. Maximilian Weidner, MAN Truck & Bus SE, Nürnberg

Dr.-Ing. Lukas Weiß, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. Thomas Willner, Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Hamburg

Dr.-Ing. Johann Wloka, MAN Energy Solutions SE, Augsburg



Mitglieder der Fuels Joint Research Group (FJRG)

- Prof. Dr. med. Jürgen Bünger, IPA Bochum
- Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker, Universität Hannover
- Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, TU Braunschweig
- Prof. Dr. Ravi Fernandes, PTB Braunschweig
- Prof. Dr.-Ing. Karl Huber, TH Ingolstadt
- Prof. Dr. Jürgen Krahl, TH OWL, Lemgo
- Dr.-Ing. Bastian Lehrheuer, RWTH Aachen
- Dr. Klaus Lucka, TEC4FUELS GmbH Aachen
- Prof. Dr.-Ing. Axel Munack, Rötgesbüttel
- Prof. Dr. Anika Sievers, HAW Hamburg
- Prof. Dr.-Ing. Thomas Schulte, iFE der TH OWL, Lemgo
- Dr. Ralf Türck, Tecosol GmbH, Ochsenfurt
- Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing, FAU Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr.-Ing. Gennadi Zikoridse, HS Technik und Wirtschaft Dresden

Angaben zu den Arbeitsgebieten der Mitglieder und zu Publikationen der FJRG sind zu finden unter: <u>www.fuels-jrg.de</u>



