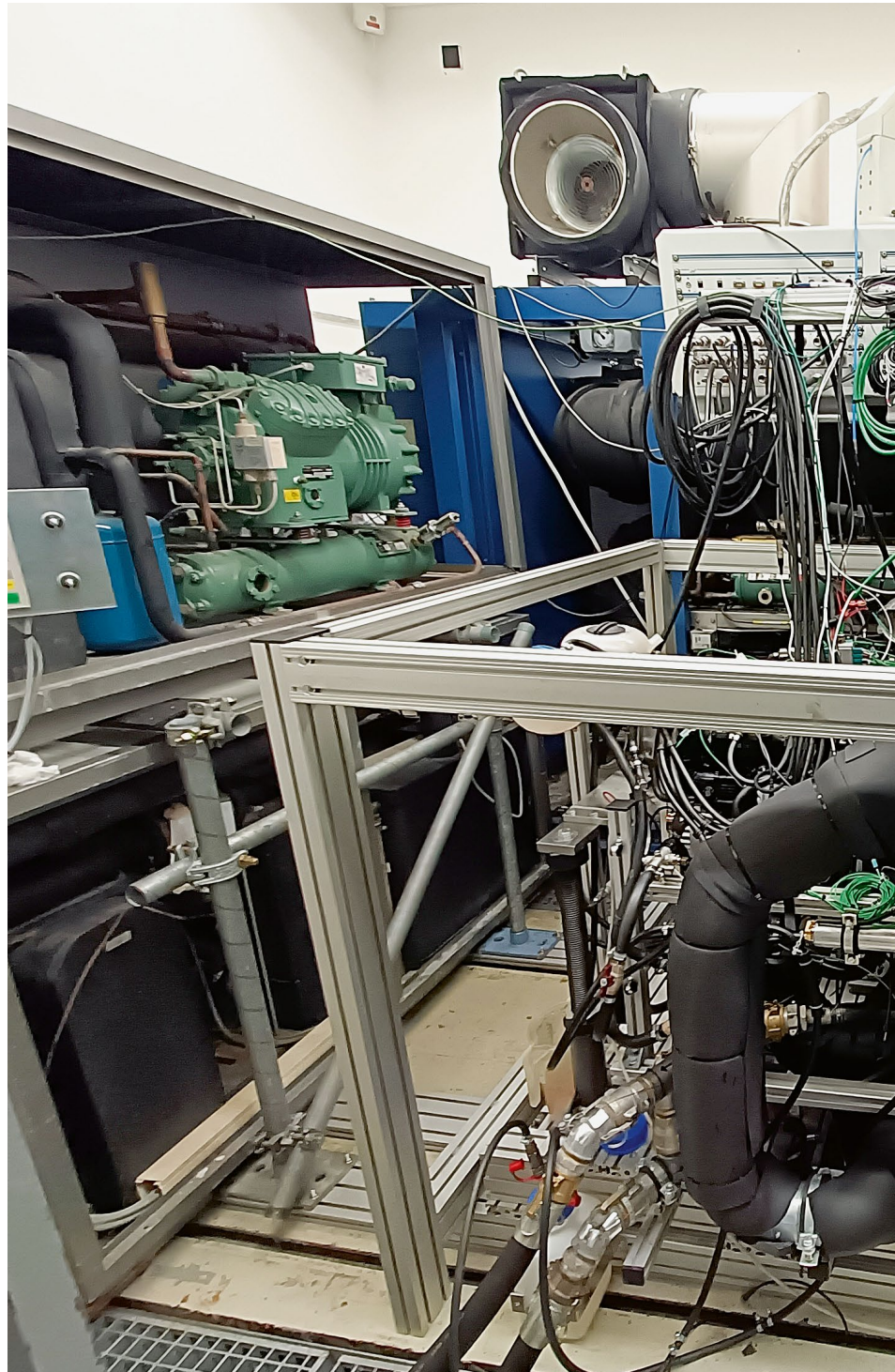


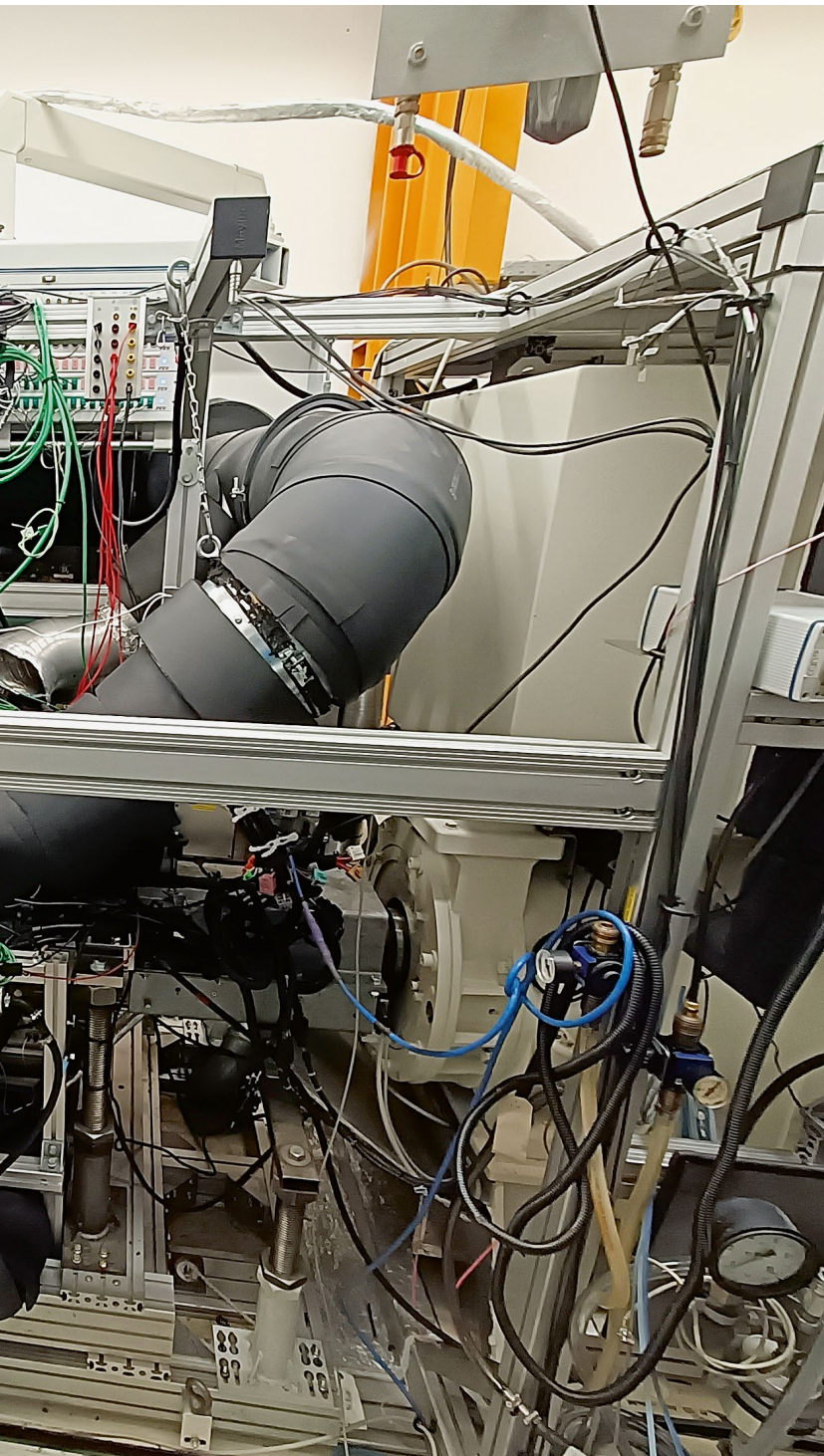
CO₂-neutrale Antriebe – Forschungen zu nicht-fossilen Energie- trägern und Lebenszyklusanalysen

Die von der FVV initiierten Forschungen tragen erheblich dazu bei, Antriebslösungen mit geringem CO₂-Fußabdruck schneller auf den Markt zu bringen. Das sind zum Beispiel Projekte, in denen eine Methodik zur Erstellung realistischer Lebenszyklusanalysen entwickelt oder das Emissionsverhalten und die Gemischbildung bei der Verwendung von alkoholhaltigen Kraftstoffen wie grünem Methanol untersucht werden.

1 TECHNOLOGIEOFFENE OBJEKTIVE BEWERTUNG

Beim Vergleich des Potenzials verschiedener Energieträger und -wandler zur Minimierung der CO₂-Emissionen müssen die Umweltauswirkungen über die gesamte Prozesskette von der Produktion bis zum Recycling betrachtet werden. Nur auf diesem Weg lassen sich die Eigenschaften der einzelnen Technologien korrekt bewerten, sodass sie optimal eingesetzt werden können. Die FVV unterstützt diesen Ansatz durch Forschungen, die die Entwicklung von Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessments, LCAs) für eine methodisch fundierte CO₂-Emissionsberechnung unterschiedlicher Antriebskonzepte ermöglichen. In einer technologieoffenen Abschätzung zeigen insbesondere kohlenstoffbasierte Energieträger, bei denen in der Atmosphäre, als Biomasse oder an Punktquellen (Schornsteinen) vorliegendes CO₂ als Rohstoff genutzt wird, hohe Potenziale. Ein Beispiel hierfür ist die Methanolsynthese, in der CO₂ mit Wasserstoff zu Methanol umgewandelt wird. Dieser chemische Weg





© IFS

STIMMEN AUS DER FVV



© FVV

Max Decker ist Stellvertretender Geschäftsführer der FVV e. V.

„In den FVV-Forschungsprojekten werden die Grundlagen für die Entwicklung zukunftsfähiger Energiewandlungssysteme erarbeitet, die die zukünftigen gesetzlichen und gesellschaftlichen Anforderungen bezüglich CO₂-Emissionen erfüllen.“



© Thomas Garbe

Prof. Dr. Thomas Garbe ist Leiter Otto- und Dieselkraftstoffe der Volkswagen AG.

„Regenerative Kraftstoffe sind für die nachhaltige Mobilität dauerhaft von großer Bedeutung. Wir unterstützen deshalb auch Grundlagenuntersuchungen zum Einsatz von Methanol, das sich mit relativ geringem Aufwand als E-Fuel wie auch biogen herstellen lässt.“



© Frank Atzler

Prof. Dr.-Ing. Frank Atzler ist Inhaber des Lehrstuhls Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme (LVAS) am Institut für Automobiltechnik der TU Dresden.

„In der FVV wird technologieoffen an Antrieben geforscht, sodass jenseits dogmatisch-ideologischer Vorgaben Freiräume für kreative Lösungen zur CO₂-Minimierung geschaffen werden, beispielsweise durch die Nutzung von grünem Methanol in Verbrennungsmotoren.“



**Science for a
moving society**

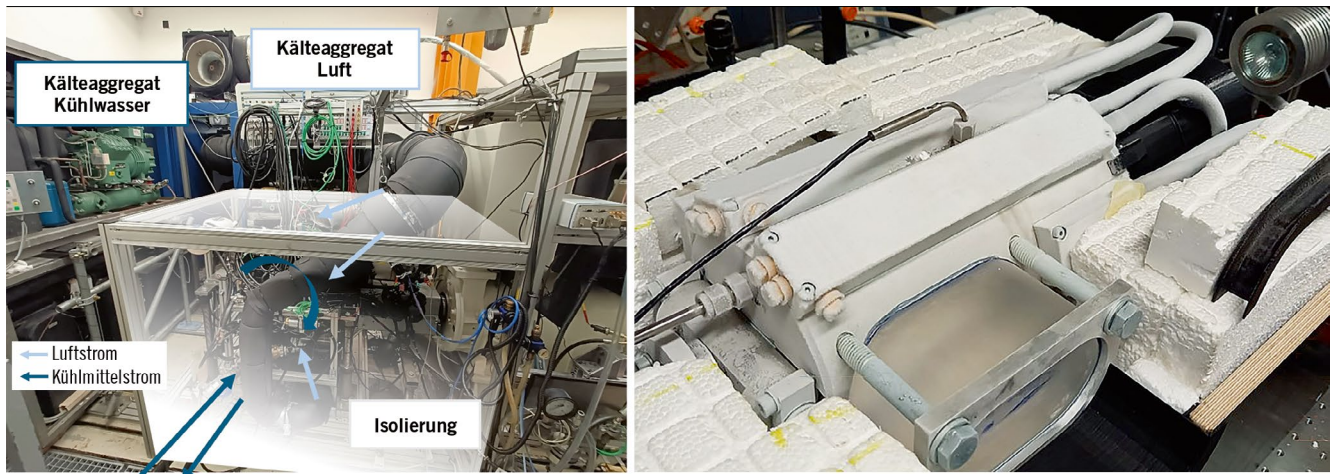


BILD 1 Vollmotorprüfstand (links) und vereiste Niederdruckkammer (rechts) © IFS | LVAS

ist essenziell für die Energiewende, da er Treibhausgasemissionen reduziert, indem er CO₂ und erneuerbaren Wasserstoff mittels regenerativ erzeugtem Strom in einen lager- und transportierbaren Kraftstoff umwandelt.

ideale Voraussetzungen für nachhaltige Antriebskonzepte mit höchsten Wirkungsgraden, die spezifischen Eigenschaften von Methanol erschweren jedoch den sicheren Motorbetrieb speziell im Kaltstart: Die hohe Verdampfungsenthalpie und der niedrige Dampf-

druck führen bei Temperaturen unter 0 °C zu unvollständiger Gemischbildung und herausfordernden Zündbedingungen. Die Folge sind Startprobleme, erhöhte Emissionen und unzuverlässiger Motorlauf – gravierende Nachteile gegenüber konventionellen Kraftstoffen.

2 KALTSTARTOPTIMIERUNG FÜR METHANOLMOTOREN

Bei der Nutzung von Methanol als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren steht die nachgewiesene Effizienzsteigerung den technischen Herausforderungen beim Motorkaltstart gegenüber. Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) geförderte Forschungsprojekt „Untersuchung von innermotorischen Maßnahmen zur Verbesserung des Kaltstartverhaltens eines M-100-Benzinmotors für den Antrieb von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen“ [1] liefert wegweisende Lösungen für einen zuverlässigen Motorkaltstart mit Methanol auch bei tiefen Umgebungstemperaturen bis -20 °C ohne zusätzliche Maßnahmen wie Vorheizen. Die Forschungen wurden am Institut für Automobiltechnik, Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme (LVAS) der TU Dresden, und am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS), Lehrstuhl Fahrzeugantriebssysteme der Universität Stuttgart, gemeinsam durchgeführt.

Zwar ermöglichen die hohe Klopfestigkeit und der hohe Sauerstoffgehalt von Methanol eine effiziente und saubere Verbrennung und bieten damit

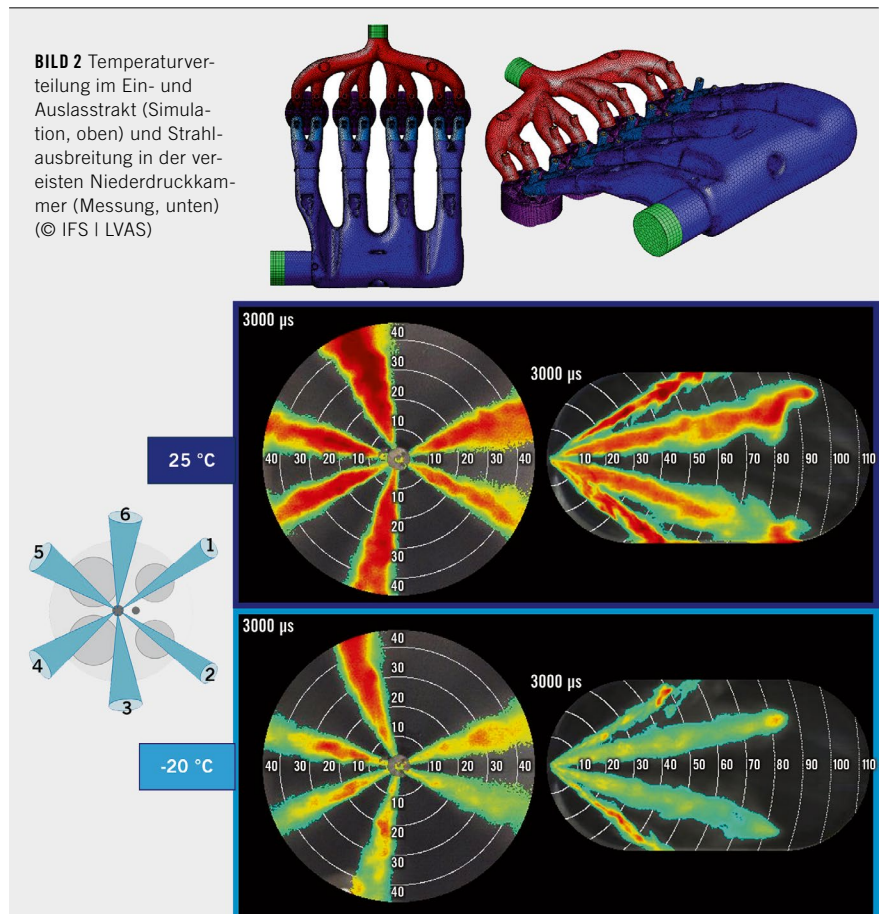


BILD 2 Temperaturverteilung im Ein- und Auslasstrakt (Simulation, oben) und Strahl ausbreitung in der vereisten Niederdruckkammer (Messung, unten) © IFS | LVAS

Die Forschenden aus Dresden und Stuttgart setzten hier auf einen synergetischen Lösungsansatz aus Experiment und Simulation. Mit Messungen an einem optisch zugänglichen Einzylinder-Forschungsmotor und einer Klimakammer wurden am LVAS Spray- und Verbrennungsvorgänge bei bis zu -25 °C untersucht, **BILD 1**. Bei etwa -10 °C sinkt der Massendurchsatz von Methanol um circa 10 % gegenüber Benzin: Die Spraypenetration steigt, wobei der Spraywinkel sinkt, was im Ergebnis zu einer deutlich verschlechterten Gemischbildung führt. Eine sogenannte Split-Injection-Strategie verbessert die Verdampfung des Kraftstoffs und damit die Gemischaufbereitung signifikant. Dabei wird der Großteil des Kraftstoffs erst im letzten Viertel des Verdichtungshubs verdampft, was die Zündstabilität erhöht. Durch eine lokale Gemischanreicherung im Bereich der Zündkerze und letztendlich die fokussierte Überschneidung von Zündung und Einspritzung konnte die Entflammungssicherheit bei niedrigen Temperaturen deutlich gesteigert werden. Im Ergebnis ließen sich Motorkaltstarts bei bis zu -20 °C ohne Zusatzmaßnahmen reproduzierbar durchführen. Die Messkampagne in Dresden wurde durch Versuche am Vollmotorprüfstand in Stuttgart (IFS) ergänzt, was die Möglichkeiten der Parameteruntersuchung deutlich erweiterte. Nicht zuletzt hat sich bei diesen Messungen gezeigt, dass die seitliche Anordnung des Direkteinspritzinjektors eine größere Herausforderung darstellt als eine zentrale Lage. Mithilfe detaillierter 3D-Strömungssimulationen konnte die Optimierung von Einspritzzeitpunkt, Mehrfacheinspritzung und Zündzeitpunkt gezielt durchgeführt werden, **BILD 2**. Die Simulationen bestätigten die experimentellen Ergebnisse und lieferten darüber hinaus zusätzliche Ansätze, wie die Injektorposition sowie das Zusammenspiel zwischen Ladungsbewegung, Einspritzung und Zündung speziell für den Kaltstart weiter optimiert werden können. Die Forschungsarbeiten sollen in einem Folgeprojekt weiter vertieft werden, indem zum Beispiel auch Kaltstarttemperaturen bis -30 °C betrachtet werden. Dadurch wird der Weg für die breite Einführung von grünem Methanol als nachhaltigem Kraftstoff geebnet.

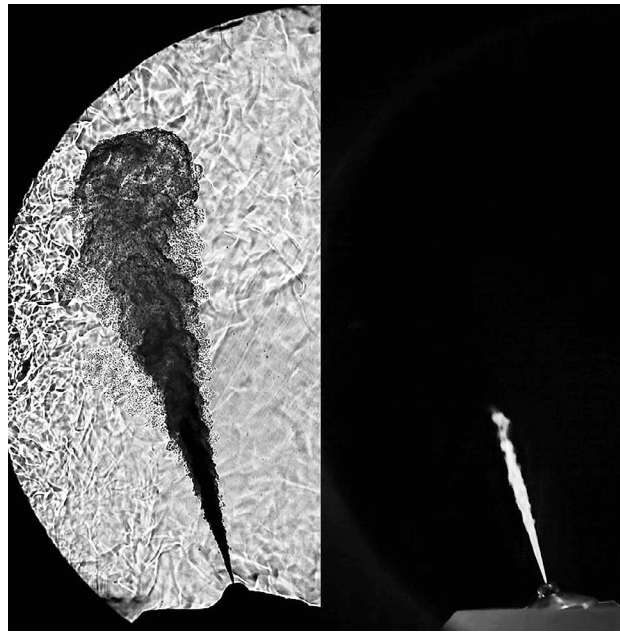


BILD 3 Dampfphase (links) und Flüssigphase (rechts) der Einspritzung eines flüchtigen Kraftstoffs: Die Flüssigkeitswolke verdampft schnell, die Flüssigkeitsausbreitung ist aufgrund der hohen Verdampfungsrates gering; die Gasphase dringt kontinuierlich tiefer in die Kammer ein (© FST)

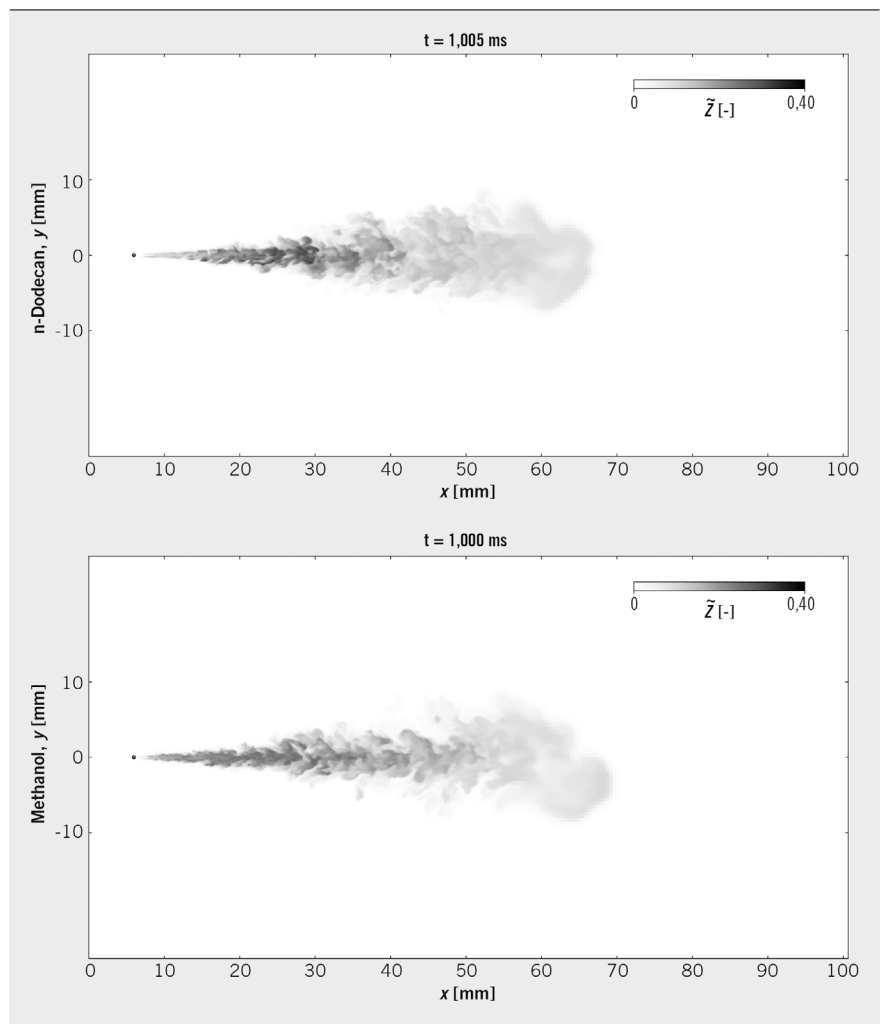


BILD 4 Numerische Simulation der Gemischbildung in der Gasphase von n-Dodecan (oben) und Methanol (unten); die Simulation erfasst das schnellere Einsetzen der Verdampfung bei Methanol, wobei die Ränder des Methanolsprays keine solch hohen Mischungsanteile (\bar{Z}) und eine etwas höhere Dampfeindringtiefe aufweisen (© STFS)

3 ALKOHOLKRAFTSTOFFE IN SCHIFFSVERBRENNUNGSMOTOREN

Bei der Minimierung der CO₂-Emissionen von Großmotoren ist die Nutzung des Energieträgers Methanol aus erneuerbaren Produktionsprozessen insbesondere im Schiffsbereich einer der vielversprechendsten Ansätze. Allerdings entsteht durch den Einsatz von Methanol in Reinform oder als Gemisch ein Spraybild, das sich von den gewohnten Spraybildern bei Kraftstoffen wie (Schwer-)Öl oder Diesel unterscheidet. Um die negativen Auswirkungen zu verringern, muss ein grundlegendes Verständnis der Kavitations-, Spray- und Gemischbildungsprozesse mit Methanol und seinen Gemischen aufgebaut werden.

Ziel des vom BMW in im Rahmen der IGF sowie international durch das Programm Collective Research Networking (CORNET) geförderten Forschungsprojekts „Alkoholkraftstoffe in Schiffverbrennungsmotoren – Kavitation und Spraybildung“ [2] ist es, den Einspritzprozess – insbesondere die Kavitation und die Spraybildung von reinem Methanol und Mischungen mit Wasser, Motoröl, Diesel und Additiven – sowie die Auswirkungen auf die Erosion zu untersuchen. Durch die Integration und Kombination fortschrittlicher optischer

und numerischer Methoden wird das bis Mitte 2027 laufende Projekt eine nahtlose und validierte Beschreibung der gesamten Prozesskette der Methanoleinspritzung bei Großmotoren vom Durchfluss durch die Düse bis zur Gemischbildung liefern. Die Forschungen werden gemeinsam von der Professur für Fluidsystemtechnik (FST) der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg, dem Argonne National Laboratory (ANL) in Chicago (Illinois), den Sandia National Laboratories (SNL) in Livermore (Kalifornien), dem Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen (HSM) der Ruhr-Universität Bochum (RUB) und dem Fachgebiet Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme (STFS) der Technischen Universität Darmstadt realisiert.

Die FAU führt Messungen der Einspritzrate und optische Untersuchungen der Spray- und Jetbildung durch, **BILD 3**. Die daraus erstellten Datensätze sind Grundlage für die Modellierung des Gemischfelds. An den SNL erfolgen neben weiteren Messungen der Spray- und Jetbildung auch Untersuchungen an transparenten Einspritzdüsen zur Betrachtung der Düseninnenströmung. Das ANL setzt zusammen mit der FAU und den SNL Röntgenmessungen am Synchrotron-Teilchenbeschleuniger

um, die hochaufgelöste Daten über die reale Strömung in und nahe der Düse liefern. Sie sollen die Validität der erarbeiteten Datensätze für die Simulationen weiter erhöhen. Die RUB führt Berechnungen der Düseninnenströmung durch und erstellt eine Nachbearbeitungs(Postprocessing)-Kette in Bezug auf Innenströmung, düsennahes Spray und erosionempfindliche Wandzonen. Im Projektverlauf entwickeln die Forschenden zudem ein Massentransfer-Kavitationsmodell, um Design- und Betriebsstrategien für Injektoren mit erhöhter Erosionsresistenz abzuleiten. Die TU Darmstadt simuliert die Spray- und Jetbildung und validiert die numerischen Untersuchungen durch die experimentell ermittelten Daten, **BILD 4**. Die Extrahierung von Temperaturverteilungen soll Einblick geben, auf welche Weise die hohe Verdampfungsenthalpie die Zündeigenschaften im Motor beeinflussen kann.

4 NACHHALTIGKEITSBEWERTUNG KÜNFTIGER ANTRIEBSYSTEME

LCAs erlauben eine systematische Bewertung der Umweltauswirkungen eines Produkts von der Entwicklung und Produktion über die Nutzungsdauer bis hin zur endgültigen Verwertung. Damit er-

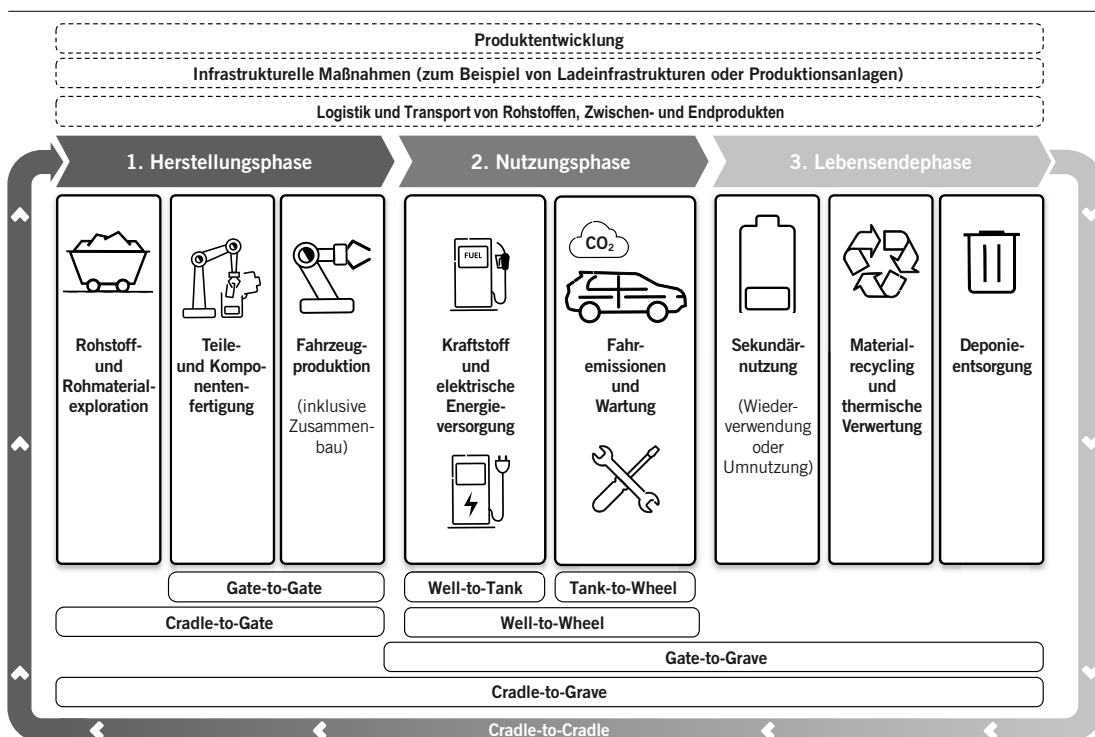


BILD 5 Phasen des Lebenszyklus eines Fahrzeugs (© RWTH Aachen)

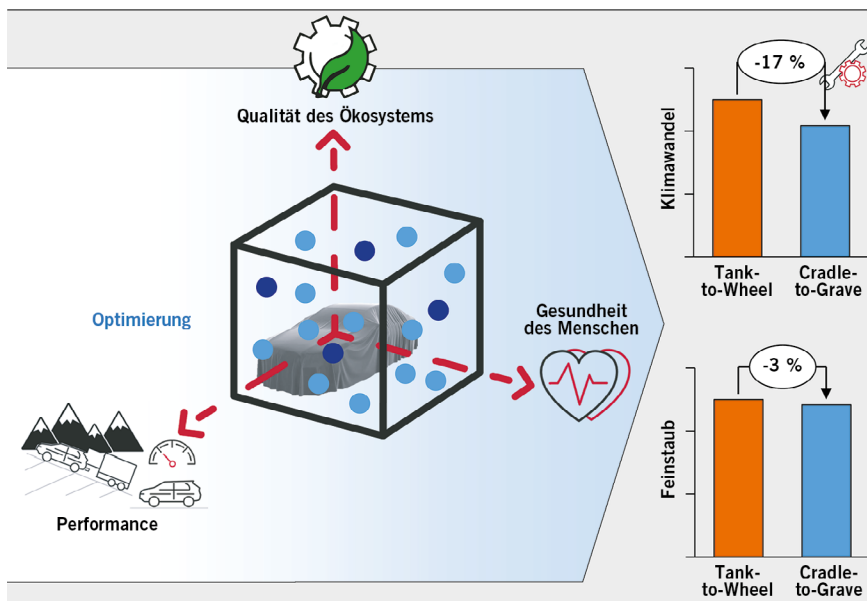


BILD 6 Lebenszyklusoptimierte Auslegung von Antriebsstrangsystemen mit Nachhaltigkeitszielwerten (© RWTH Aachen)

möglichen sie einen qualifizierten ökologischen Vergleich unterschiedlicher Antriebskonzepte und Energiesysteme. Durch das am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen University durchgeführte FVV-Projekt „Nachhaltige mobile Antriebssysteme 2035+“ [3] wird ein methodischer Rahmen entwickelt, der LCAs für mobile Antriebssysteme systematisch strukturiert und für die Fahrzeugkonzeptbewertung nutzbar macht, **BILD 5**. Das Projekt baut auf dem FVV-Projekt „HyFlex-ICE“ auf. Dort hatten die Forschenden eine ganzheitliche Methodik zur Optimierung des Betriebs aller Antriebsstrangkomponenten am Beispiel eines Hybridantriebs erarbeitet und daraus ein optimales Hybridantriebsdesign für eine exemplarische Anwendung abgeleitet. Ziel des aktuellen Forschungsvorhabens ist es, das HyFlex-ICE-Projekt durch die Integration zusätzlicher Nachhaltigkeitszielwerte zu erweitern, sodass eine lebenszyklusoptimierte Auslegung von mobilen Antriebssystemen ermöglicht wird.

In einem ersten Schritt entwickelten die Forschenden am TME ein modulares LCA-Sachbilanzierungsmodell, das zukünftig relevante konventionelle und elektrifizierte Antriebssysteme inklusive der Energieträgererzeugungspfade (Elektrizität, H₂, e-Methanol, e-Methan, Methanol-to-Gasoline, Fischer-Tropsch-Synthese) berück-

sichtigt. Das LCA-Modell kann verschiedene Detaillierungsgrade abbilden und ist für Pkw, Nfz, Schiffsanwendungen, Baumaschinen und andere mobile Anwendungen gleichermaßen geeignet, **BILD 6**.

Für die Wirkungsabschätzung und -analyse wurden Unterschiede in den Berechnungsmethoden untersucht. Zu den herangezogenen Rahmenwerken zählen unter anderem der von der EU definierte ökologische Fußabdruck für Produkte (Product Environmental Footprint, PEF), die sogenannten ReCiPe- und CML-Methoden zur Folgenabschätzung innerhalb einer LCA (letztere benannt nach dem Centrum voor Milieukunde der Universität Leiden). Gemeinsam mit dem projektbegleitenden Arbeitskreis wird daraus eine FVV-LCA-Methodik entwickelt, die zur Konzeptbewertung von Fahrzeugen mit Fokus auf das Antriebssystem dient.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde ermittelt, welche nachhaltigkeitsbestimmenden Parameter den größten Einfluss auf das Ergebnis und damit auf die Definition der Randbedingungen der LCA haben. Zur Prüfung der FVV-LCA-Methodik führen die Forschenden derzeit für exemplarische Fahrzeuge mit verschiedenen Antriebssystemen eine Systemauslegung inklusive einer vergleichenden LCA nach DIN EN ISO 14040/44 durch. Bei der Optimierung berücksichtigen sie dabei neben herkömmlichen

Kriterien wie Effizienz, Systemkosten und Akustikverhalten auch ausgewählte Nachhaltigkeitsbewertungskriterien aus dem zuvor entwickelten LCA-Modell und der Methodik. Ziel ist es, den FVV-Mitgliedern künftig eine klar strukturierte Methodik zur lebenszyklusbasierten Auslegung von Antriebsstrangsystemen bereitzustellen, die eine einheitliche und gut nachvollziehbare Bewertung und den Vergleich der Studien ermöglicht.

5 FAZIT

Die FVV treibt mit ihren Forschungsprojekten die Entwicklung aller Antriebs- und Energiesysteme mit Reduktionspotenzial für CO₂-Emissionen weiter voran. LCAs, die auf wissenschaftlich fundierten Annahmen und Abschätzungen beruhen, ermöglichen dabei eine realistische CO₂-Emissionsbewertung. Die Verwendung von alkoholhaltigen Kraftstoffen wie grünem Methanol zeigt großes Potenzial für künftige Energiesysteme, bringt aber technische Herausforderungen mit sich. FVV-Projekte hierzu adressieren daher Fragestellungen zur Optimierung der Gemischbildung oder zur Reduzierung der Kaltstartemissionen. Dabei wird die komplette Anwendungsbreite vom Pkw bis hin zur Schiffsanwendung abgedeckt.

LITERATURHINWEISE

- [1] FVV-Forschungsvorhaben „Untersuchung von innermotorischen Maßnahmen zur Verbesserung des Kaltstartverhaltens eines M-100-Benzinmotors für den Antrieb von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen.“ Projektleitung: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Garbe (Volkswagen AG). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Frank Atzler (IAD, TU Dresden), Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Casal Kulzer (IFS, Universität Stuttgart)
- [2] FVV-Forschungsvorhaben „Alkoholkraftstoffe in Schiffsverbrennungsmotoren – Kavitation und Spraybildung“. Projektleitung: Dr.-Ing. Johann Wloka (Everlence SE). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing (FST, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), Prof. Dr.-Ing. Romuald Skoda (HSM, Ruhr-Universität Bochum), Prof. Dr.-Ing. Christian Hasse (STFS, Technische Universität Darmstadt), Isaac Ekoto (Sandia National Laboratories), Paul Kearns (Argonne National Laboratory)
- [3] FVV-Forschungsvorhaben „Lebenszyklusmodellierung und -bewertung zur optimalen und nachhaltigen Auslegung von Antriebssystemen in Pkw und Lkw“. Projektleitung: Dipl.-Ing. Marc Sens (IAV GmbH). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger (TME, RWTH Aachen)



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.mtz-worldwide.com