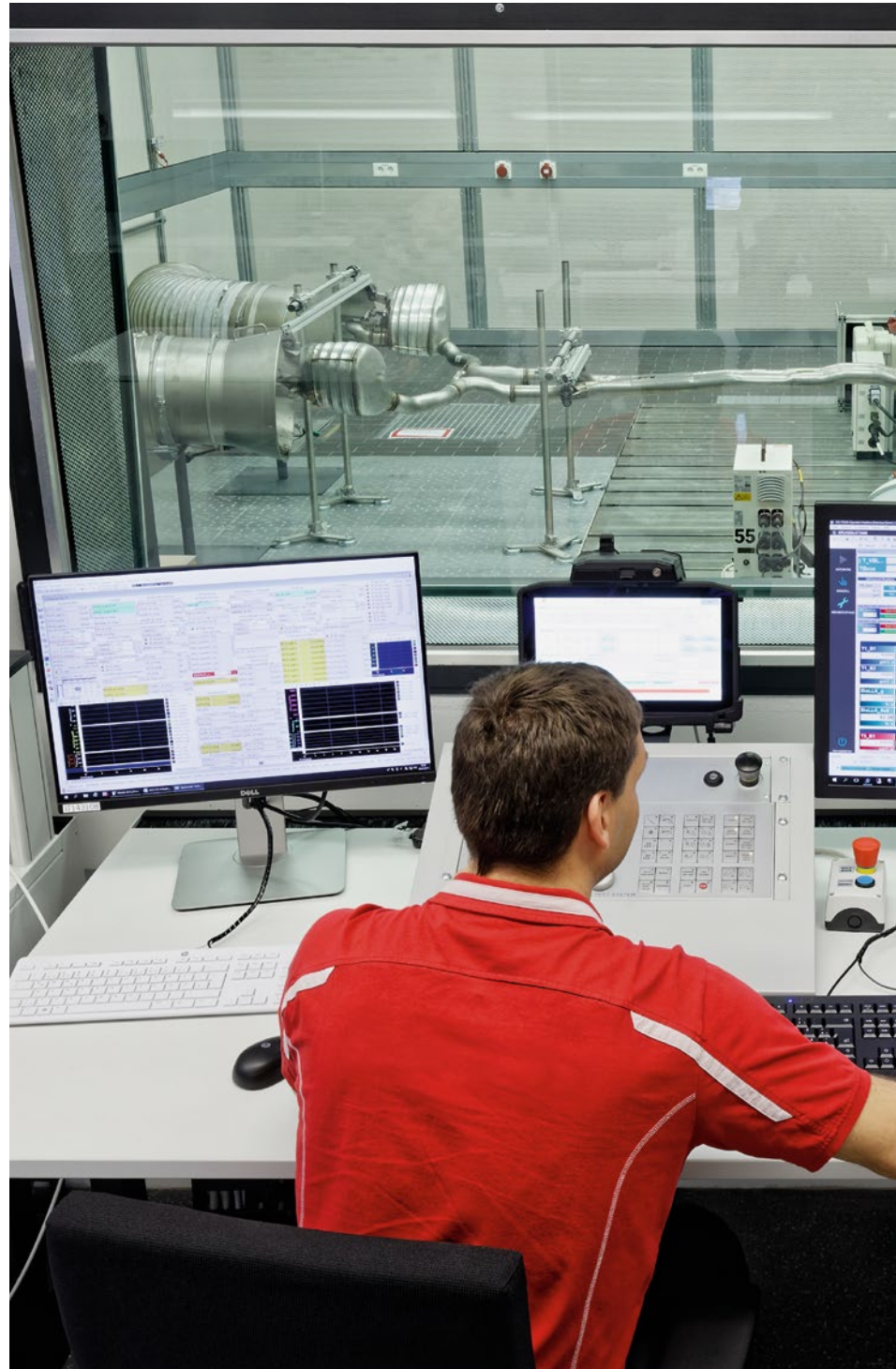


Fremdgezündete Motoren – Grundlagenforschungen für eine nachhaltige individuelle Mobilität

Fremdgezündete Verbrennungsmotoren haben einen wesentlichen Anteil an den Antrieben für die individuelle Mobilität – nicht nur heute, sondern als Bestandteil elektrifizierter Antriebe auch in den kommenden Jahrzehnten. Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV) widmet daher der CO₂-Absenkung beim Einsatz dieser Motoren zahlreiche Forschungsvorhaben. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf dem Realbetrieb mit CO₂-neutral hergestellten Kraftstoffen.

1 MOTIVATION

Durch das Wachstum der weltweiten Bevölkerung und des Wohlstands steigt auch die Nachfrage nach individueller Mobilität. Aufgabe der Industrie ist es, auf diese Nachfrage mit Angeboten zu reagieren, die die Ziele der Vereinten Nationen für eine nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals) [1] unterstützen. Dazu gehören neben dem Klimaschutz (Ziel 13) auch weitere Ziele, die die Motorenforschung betreffen, wie Gesundheit (Ziel 3), Beschäftigung (Ziel 8) oder eine verantwortungsvolle Produktion (Ziel 12). Derzeit haben fremdgezündete Verbrennungsmotoren einen hohen Anteil an der weltweiten individuellen Mobilität. Angesichts der Diversität der Anforderungen und der regionalen infrastrukturellen Voraussetzungen ist es unwahrscheinlich, dass eine einzelne Antriebstechnologie den mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Ottomotor kurzfristig vollständig ablöst. Vielmehr ist anzunehmen, dass auf absehbare Zeit verschiedene Technolo-





© Porsche

STIMMEN AUS DER FVV



© FVV

Dr.-Ing. André Casal Kulzer ist Leiter Thermodynamik in der Antriebsvorausentwicklung bei Porsche in Stuttgart. In der FVV leitet er die Planungsgruppe 2 „Selbstzündung“.

„Mit der Forschung in der FVV legen wir die technischen Grundlagen, um geopolitische Fragen der Energieversorgung beantworten zu können.“



© ITV

Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker leitet das Institut für Technische Verbrennung (ITV) der Leibniz Universität Hannover, das als Forschungsstelle FVV-Vorhaben bearbeitet. „Grundlegendes Verständnis und Methodenkompetenz sind die Voraussetzung für den Einsatz regenerativer Energieträger.“



© Toyota

Koichi Nakata ist General Manager der Toyota Motor Corporation in Susono (Shizouka), Japan.

„Künftig wird die Zusammenarbeit zwischen Motoren- und Kraftstoffentwicklung bei der Reduktion von Treibhausgasen wichtiger werden. Deshalb nützt die Forschung auf diesem Feld der ganzen Welt.“



© BTU

Prof. Dr.-Ing. Fabian Mauß ist Inhaber des Lehrstuhls Thermodynamik/Thermische Verfahrenstechnik am Institut für Elektrische Systeme und Energielogistik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU).

„Die Ergänzung herkömmlicher Kraftstoffe durch synthetische Komponenten auf Basis von Wasserstoff kann die Bestandsflotte klimaverträglicher machen.“



<http://www.fvv-net.de>

	Wirkungsgrad WLTC	Route A „Sportlich“	Route B „Sportlich“	Route C „Moderat“	Route D „Moderat“	Durchschnittlicher Wirkungsgrad RDE
Effizienzmotor (ohne AGR)	39,9 %	41,7 %	41,8 %	40,5 %	39,7 %	40,9 %
Effizienzmotor (mit AGR)	40,6 %	42,6 %	43,2 %	41,3 %	40,4 %	41,9 %
Methanol-motor	43,3 %	46,0 %	45,6 %	44,6 %	42,5 %	44,7 %

TABELLE 1 Antriebswirkungsgrad eines Hocheffizienzmotors in verschiedenen Fahrzyklen (© FVV)

Cluster	Kraftstoff	ρ_{norm} [kg/m ³]	Δ LHV [MJ/kg]	Δ LHV [MJ/l]	C : H : O [-]	Δ RON [-]	Δ MON [-]	$\Delta\eta_i$ [%]
Referenz	RON95E10	756,25	41,16	31,13	6,3 : 11,7 : 0,2	96,7	87,4	39,4
1	M29	765,92	-6,1	-4,27	3,5 : 7,6 : 0,6	+4,70	+0,80	+4,17
1	E49	772,02	-7,07	-4,81	3,5 : 8,0 : 0,7	+9,30	+3,90	+4,83
1	H45	415,98	+35,16	+0,0	0,16 : 13,7 : 0,01	-	-	+3,09
2	M11	759,97	-2,35	-1,63	4,9 : 9,7 : 0,4	+1,90	+0,30	+3,47
2	E25	764,39	-3,64	-2,45	4,6 : 9,4 : 0,5	+4,80	+2,00	+4,08
2	H45	415,98	+35,16	-	0,16 : 13,7 : 0,01	-	-	+3,09

Legende = Cluster 1: niedrige CO₂-Emissionen; Cluster 2: niedriger Kraftstoffverbrauch; M: Methanol; E: Ethanol; H: Wasserstoff; ρ_{norm} : Dichte bei Normalbedingungen; Δ LHV: Veränderung des unteren Heizwerts im Vergleich zur Referenz; C:H:O: Verhältnis Kohlenstoff zu Wasserstoff zu Sauerstoff; Δ RON: Veränderung der Research-Oktanzahl (ROZ) im Vergleich zur Referenz; Δ MON: Veränderung der Motor-Oktanzahl (MOZ) im Vergleich zur Referenz; $\Delta\eta_i$: Veränderung der Effizienz der Verbrennung im Vergleich zur Referenz

TABELLE 2 Wirkungsgradsteigerungen durch verschiedene Beimischungen zu Norm-Ottokraftstoff (© Fabian Mauß | BTU)

gien nebeneinander existieren und sich in Hybridkonzepten ergänzen werden. Hinzu kommt, dass im Sinne der Nachhaltigkeit immer auch der aktuelle weltweite Bestand von rund 1,2 Milliarden Personenkraftwagen [2] berücksichtigt werden sollte, von denen ein hoher, nicht exakt zu beziffernder Anteil über einen Ottomotor verfügt. Weitere Forschung zu fremdgezündeten Motoren mit dem Fokus auf hohe Nachhaltigkeit ist vor diesem Hintergrund zwingend geboten. Dabei muss nicht nur der Energiewandler selbst, sondern die komplette Energiekette (Well-to-Wheel) sowie der ganze Produktlebenszyklus (Cradle-to-Grave) berücksichtigt werden. Die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF), wie sie die FVV betreibt und die folgenden Projekte beispielhaft beschreiben, schafft die methodischen und technologischen Voraussetzungen, wobei auch bewusst kleine und mittlere Unternehmen in den Innovationsprozess einbezogen werden.

2 SYSTEMATISCHE WIRKUNGSGRADOPTIMIERUNG

Einen wesentlichen Beitrag zu höherer Nachhaltigkeit leisten fremdgezündete

Motoren, wenn es gelingt, ihren Wirkungsgrad im realen Fahrbetrieb deutlich zu steigern, ohne dass sich die Umweltbilanz durch höhere Schadstoffemissionen oder geringere Dauerhaltbarkeit verschlechtert. Im FVV-Vorhaben „ICE 2025+“ [3], das Ende 2020 abgeschlossen werden konnte, untersuchten Forschungsstellen der RWTH Aachen, der Technischen Universität Braunschweig, der Technischen Universität Darmstadt und der Universität Stuttgart gemeinsam, wie sich die Kombination verschiedener Technologien auswirkt. Ziel war dabei ein bestmöglicher Wirkungsgrad explizit des gesamten Antriebsstrangs in realitätsnahen Fahrzyklen. In verschiedenen Technologiepaketen wurden unter anderem eine hohe Verdichtung und flexible Ventilsteuerzeiten inklusive des Miller-Verfahrens, Abgasrückführung, Steuerung der Ladungsbewegung, Vorkammerzündung, Wassereinspritzung, Magerbetrieb sowie die Auslegung des Motors als Langhuber untersucht. Für die Ermittlung des Antriebsstrangwirkungsgrads legten die Forscher verschiedene Varianten der Hybridisierung zugrunde, wobei elektrische Energie berücksich-

tigt wurde, die nur durch Rekuperation an Bord gewonnen wurde. Die Wechselwirkung mit alternativen, potenziell CO₂-neutralen Kraftstoffen wurde ebenfalls untersucht.

Schon vor Projektende stand fest, dass mit normgerechtem Ottokraftstoff für ein Mittelklassefahrzeug (C-Segment) durch eine geeignete Technologiekombination ein Antriebsstrangwirkungsgrad von mehr als 40 % erreicht werden kann. Betrug der Mittelwert im gesetzlichen Prüfzyklus des Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle (WLTC) 40,6 %, so konnten im Mittel der simulierten Zyklen der Real Driving Emissions (RDE) sogar 41,9 % erreicht werden, TABELLE 1. Mit Ersetzen des Normkraftstoffs durch Methanol erreichte der Hybridantrieb im C-Segment-Fahrzeug im Normzyklus im simulierten Wirkungsgrad von 43,4 %, im simulierten Straßenbetrieb durchschnittlich 42,7 %. Darüber hinaus wurden zusätzliche Potenziale eines Magerbetriebs untersucht. Mit Luftüberschuss betrieben, erreichte der Methanolmotor Wirkungsgrade über 40 % in einem großen Teil des Motor-kennfelds – in der Spitze sogar 46,9 %. Im Vergleich zu einem Ottomotor nach

Stand der Technik entspricht dies einer CO₂-Reduzierung um bis zu 25 %.

3 OPTIMIERTE KRAFTSTOFF-ZUSAMMENSETZUNG

Die Beimischung regenerativ erzeugter Kraftstoffe kann in der Bestandsflotte schnell zu einer deutlichen Reduktion des CO₂-Ausstoßes führen. Für viele der derzeit diskutierten Kraftstoffe liegen allerdings bislang keine oder wenige grundsätzliche Untersuchungen zum thermodynamischen Verhalten vor. Für eine Simulation der Verbrennung und bestimmter Phänomene wie der unkontrollierten Selbstzündung ist jedoch eine genaue Kenntnis der Reaktionskinetik notwendig. Das Vorhaben „Kraftstoffzusammensetzung zur CO₂-Reduzierung“ soll daher auch die Frage beantworten, wie neue Generationen von Kraftstoffen und deren Zusammensetzung dazu beitragen können, den Wirkungsgrad zu verbessern [4]. In der Zusammenarbeit von fünf Forschungsstellen wird das Verhalten unterschiedlicher Kraftstoffmoleküle analysiert und während der Verbrennung messtechnisch erfasst, um

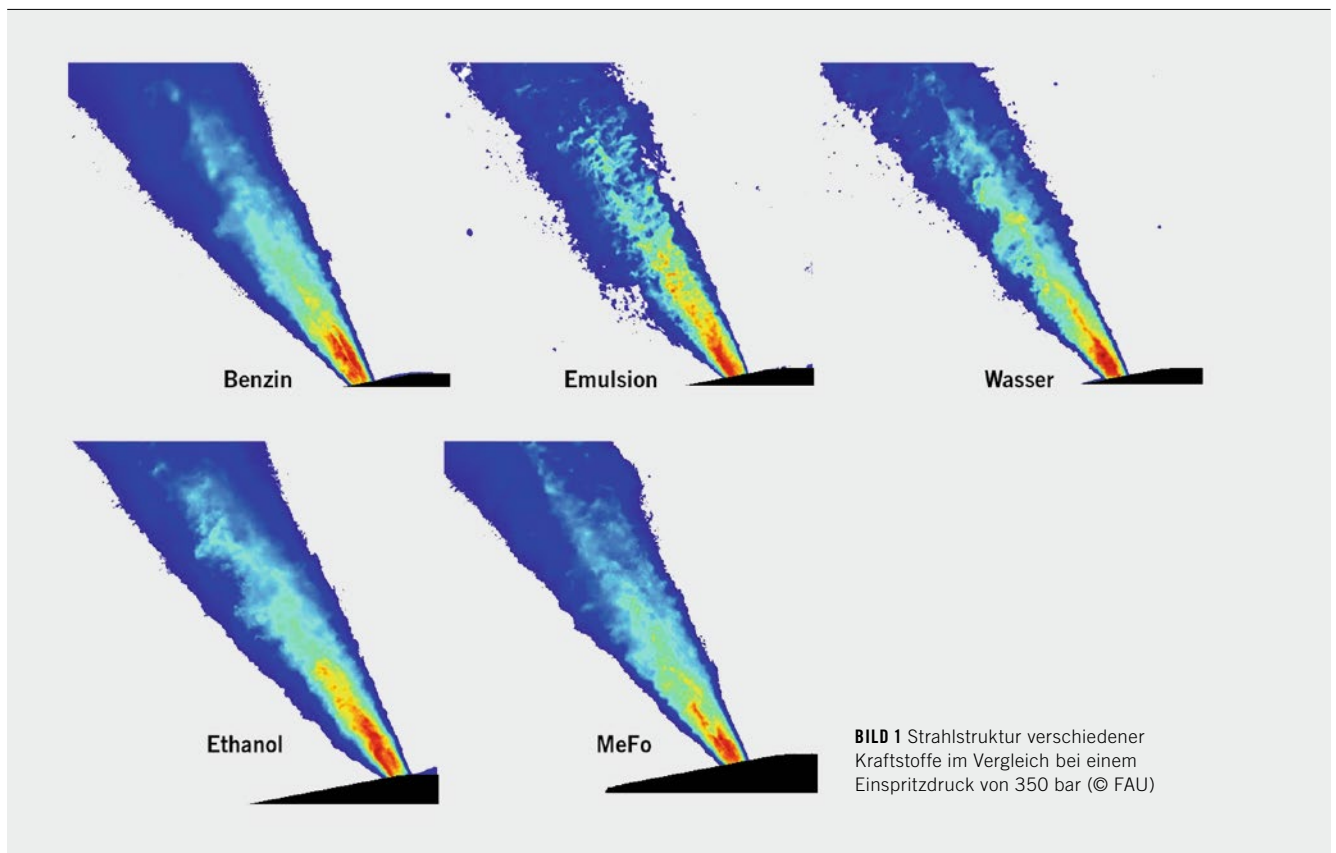
es in geeignete Simulationsverfahren zu überführen. Zunächst wählten die Projektpartner gemeinsam Kraftstoffkomponenten aus, die das Potenzial besitzen, die Klopfneigung zu verringern und gleichzeitig die Brenngeschwindigkeit zu steigern, um die Effizienz der Verbrennung zu erhöhen. Basierend auf neuen Messungen und verfügbaren Literaturdaten wird derzeit ein Reaktionsmechanismus entwickelt und in numerischen Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) angewendet. Abgeleitet wird ein Modell, mit dem Mischungen aus Norm-Ottokraftstoff und alternativen Kraftstoffen auf minimale CO₂-Emissionen ausgelegt werden können. Bereits ein Jahr nach Projektbeginn zeigte sich, dass Beimischungen wiederum über einen erhöhten Wirkungsgrad ein zusätzliches CO₂-Minderungspotenzial in einer Tank-to-Wheel-Betrachtung bieten, **TABELLE 2**. Hierfür wurde an der Brandenburgischen Technischen Universität eine virtuelle simultane Optimierungsplattform für Kraftstoffe und Motoren entwickelt und eingesetzt. Die Ergebnisse des Projekts – in Form sowohl einer erweiterten Fassung

des nulldimensionalen Berechnungsprogramms „FVV-Zylindermodul“ als auch einer detaillierten Datensammlung zu den einzelnen Kraftstoffkomponenten – werden als Wissensbasis der kompletten Industrie zur Verfügung stehen. Der Abschluss ist für das Jahr 2022 geplant.

4 STRAHLDIAGNOSTIK

Sind für das Verbrennungsverhalten vor allem die chemischen Eigenschaften neuer Kraftstoffe entscheidend, so stehen bei der Gemischbildung die physikalischen Eigenschaften im Vordergrund. Bei Direkteinspritzung entscheidet das Aufbrechen des Einspritzstrahls in feine Tröpfchen wesentlich über Effizienz und Schadstoffemissionen. Zum Primärzerfall des Strahls gibt es bislang wenig Daten, dies gilt erst recht für den Einsatz von strombasierten Kraftstoffen (E-Fuels).

In dem in 2020 abgeschlossenen Vorhaben „Strahldiagnostik an ottomotorischen E-Fuels“ untersuchten Forschungsstellen an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und der Leibniz Universität Hannover den Strahl-



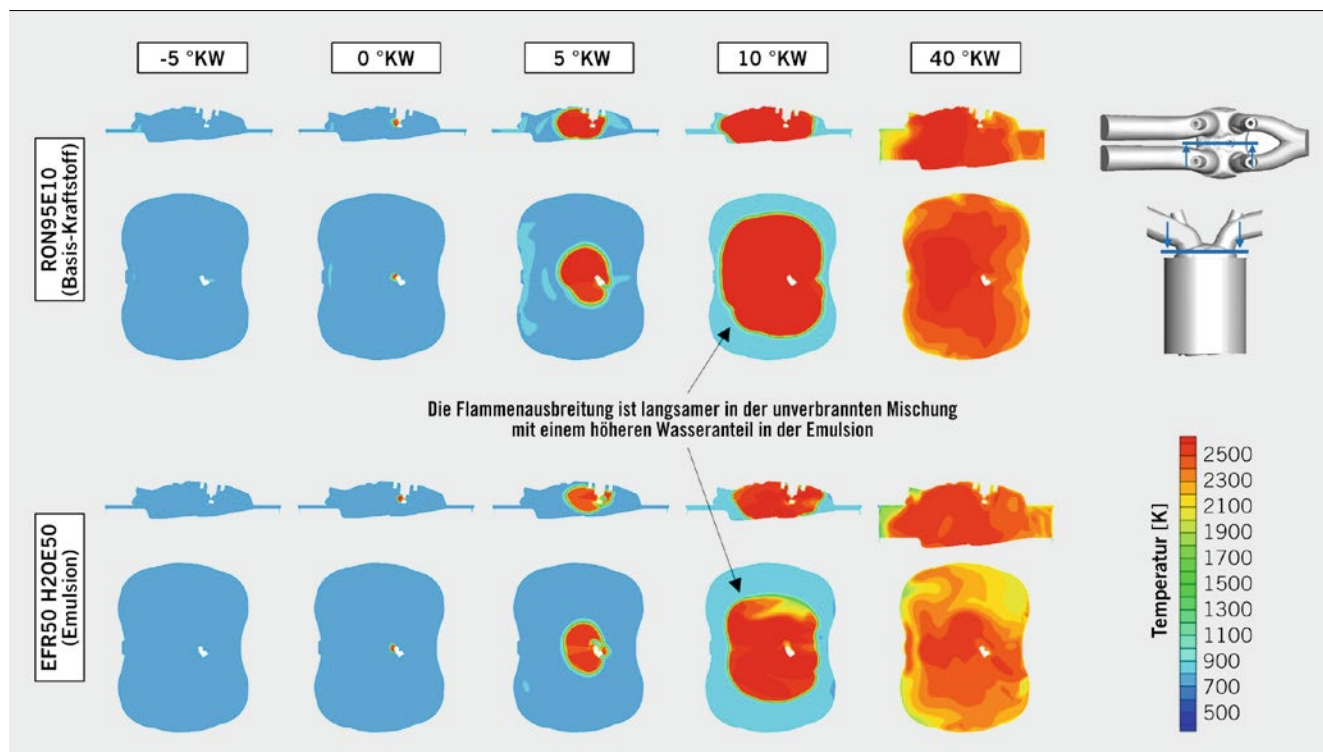


BILD 2 Vergleich des Temperaturfelds für die Verbrennung von RON95E10-Kraftstoff (iso-Oktan: 40,3 Massen-%; n-Heptan: 12,6 Massen-%; Toluol: 36,5 Massen-%; Ethanol: 10,6 Massen-%) und EFR50-H2OE50-Emulsion (iso-Oktan: 26,9 Massen-%; n-Heptan: 8,4 Massen-%; Toluol: 24,3 Massen-%; Ethanol: 18,2 Massen-%; Wasser: 22,2 Massen-%) bei unterschiedlichen Grad Kurbelwinkeln (© BTU)

zerfall von normgerechtem Ottokraftstoff, Methylformiat (MeFo), Ethanol, Wasser sowie einer Wasser-Benzin-Emulsion mit unterschiedlichen Messtechniken [5]. In einem weiteren Vorhaben wurden parallel dieselben Untersuchungen an künftigen Dieselmotoren durchgeführt. Die Strahlstruktur wurde mithilfe von fluoreszenzmikroskopischen Untersuchungen und einer Röntgen-Phasenkontrast-Bildgebung analysiert. Beide Verfahren führen zu ähnlichen Ergebnissen: Die Strukturbilder für Benzin, MeFo und Ethanol unterscheiden sich nur geringfügig, wohingegen Wasser und die Wasser-Benzin-Emulsion einen deutlich größeren Aufbruch aufweisen, **BILD 1**. Die Aufbruchgeschwindigkeit wurde mit einem Röntgenkontrastverfahren sowie dem neuen kamerabasierten Verfahren Structural Image Velocimetry (SIV) untersucht. Das vergleichsweise einfach zu realisierende SIV-Verfahren wies hinreichend genaue Ergebnisse auf. Am schnellsten brachen die Strahlen bei Benzin und Ethanol auf, wohingegen MeFo, die Emulsion und reines Wasser in absteigender Reihenfolge am meisten Zeit benötigten.

5 WASSEREINSPRITZUNG

Zur Diversität künftiger Antriebe tragen auch Motoren mit hoher Leistungsdichte für besonders sportliche Fahrzeuge bei. Die große Herausforderung bei der Auslegung solcher Motoren ist das Betriebsverhalten in vollastnahen Bereichen. Eine Vollastanreicherung zur Absenkung des Temperaturniveaus kommt aus Schadstoffemissions- und Verbrauchsgründen nicht mehr in Frage. Die Wassereinspritzung stellt eine Alternative dar und wurde im Rahmen eines FVV-Vorhabens bereits wissenschaftlich untersucht. Es verbleibt jedoch die Aufgabenstellung, einen möglichst hohen „Wasserwirkungsgrad“ zu erreichen. **BILD 2** zeigt CFD-Simulationen der Temperaturfelder für die Verbrennung von RON95E10 und EFR50 H2OE50 unter Einbeziehung der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Modelle (RANS) [6]. In einem Folgevorhaben [7] wird daher eine Hochdruck-Direkteinspritzung mit 500 bar sowie die Verwendung einer Kraftstoff-Wasser-Emulsion untersucht. Das Projekt umfasst auch weitere Technikbausteine zur Verbesserung der Verdampfungseigenschaften

sowie Mehrfach-Einspritzstrategien. Zudem sollen die Auswirkungen der Wassereinspritzung auf den Ölhaushalt, die Abgasnachbehandlung und andere Systembestandteile betrachtet und die dafür notwendigen Simulationsverfahren entwickelt werden. Das Vorhaben wird im Frühjahr 2022 abgeschlossen.

6 PERSPEKTIVEN

Bereits die aktuelle Forschungstätigkeit bei fremdgezündeten Motoren ist geprägt vom Einsatz neuer Betriebs- und Kraftstoffe sowie dem Ziel der Reduzierung von CO₂-Emissionen oder gar der Neutralisierung im realen Betrieb. Künftige Vorhaben sind noch stärker auf dieses Ziel ausgerichtet. Mehrere Projekte sind in Planung oder bereits am Start, in denen die Wasserstoffverbrennung im Hubkolbenmotor grundlegend untersucht werden soll. Damit unterstützt die FVV-Forschung die Wasserstoffstrategien Deutschlands und Europas und schafft die technischen Grundlagen zur Industrialisierung. So werden auch auf weiterverarbeitetem grünen Wasserstoff basierende Kraftstoffe wie Methanol bezie-

ungsweise daraus gewonnenes Benzin untersucht. Das beschriebene Projekt „ICE2025+“ wird fortgesetzt und um den Betrieb mit mehreren alternativen Kraftstoffen und einer mageren Verbrennung erweitert. Parallel stellen künftige Vorhaben darauf ab, die Methoden der Künstlichen Intelligenz für die Motorentwicklung zu nutzen, was allein dank der erheblichen Datenmengen aus Versuchsreihen von früheren FVV-Projekten sinnvoll ist. Durch die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) können auch kleine und mittlere Unternehmen auf KI-basierte Simulationsmethoden zurückgreifen. Nachhaltigkeit im Sinne der Ziele der Vereinten Nationen verlangt auch, CO₂-arme und -neutrale Motoren so robust auszuliegen, dass sie hohe Betriebsstundenzahlen erreichen. Die Beantwortung von Forschungsfragen zur Betriebsfestigkeit und zu neuartigen Werkstoffen – in der FVV durch eine eigene Planungsgruppe verankert – werden daher weiterhin verfolgt.

LITERATURHINWEISE

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs: The 17 Goals. Online: <https://sdgs.un.org/goals>, aufgerufen 14. Oktober 2020
- [2] Umweltbundesamt: Weltweiter Autobestand. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/weltweiter-autobestand>, aufgerufen 14. Oktober 2020
- [3] IGF-Forschungsvorhaben „ICE2025+: Ultimate System Efficiency: Grenzen der ottomotorischen

Wirkungsgradsteigerung in hybridisierten Antriebssträngen“. Fördergeber: FVV (1307). Projektleitung: Arndt Döhler (Opel Automobile GmbH) und Dr.-Ing. André Casal Kulzer (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG), Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende (Institut für Fahrzeugantriebe, Universität Stuttgart), Prof. Dr.-Ing. Christian Beidl (Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe, TU Darmstadt), Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts (Institut für Verbrennungskraftmaschinen, TU Braunschweig), Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger (Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, RWTH Aachen). In: FVV (Hrsg.): Tagungsband R590, S. 333-370, Frankfurt am Main, 2019

[4] IGF-Forschungsvorhaben „Kraftstoffzusammensetzung zur CO₂-Reduktion“. Fördergeber: FVV (1348). Projektleitung: Dr. Yoshihiro Okada (Toyota Motor Corporation), Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende (Institut für Fahrzeugantriebe, Universität Stuttgart), Prof. Dr.-Ing. Karl Alexander Heufer (Physico-Chemical Fundamentals of Combustion, RWTH Aachen), Prof. Dr.-Ing. Fabian Mauß (Lehrstuhl Thermodynamik/Thermische Verfahrenstechnik, BTU Cottbus Senftenberg), Prof. Dr.-Ing. Heinz Pitsch (Institut für Technische Verbrennung, RWTH Aachen), Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger (Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, RWTH Aachen). (Unveröffentlicht)

[5] IGF-Forschungsvorhaben „Strahldiagnostik an ottomotorischen E-Fuels unter RDE-Bedingungen“. Fördergeber: FVV (1317). Projektleitung: Dr.-Ing. Eberhard Kull (Vitesco Technologies GmbH), Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing (Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker (Institut für Technische Verbrennung, Leibniz Universität Hannover). In: FVV (Hrsg.): Tagungsband R596, S. 145-178, Frankfurt am Main, 2020

[6] Netzer et al.: Numerical Analysis of the Impact of Water Injection on Combustion and Thermodynamics in a Gasoline Engine Using Detailed Chemistry.

In: SAE International Journal of Engines, Nr. 11(6), S. 1151-1166, 2018

[7] IGF-Forschungsvorhaben „Wassereinspritzung bei Ottomotoren II“. Fördergeber: FVV (1367). Projektleitung: Dr.-Ing. André Casal Kulzer (Dr. h.c. F. Porsche AG), Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller (Fachgebiet Fahrzeugantriebe, TU Berlin), Prof. Dr.-Ing. Fabian Mauß (Lehrstuhl Thermodynamik/Thermische Verfahrenstechnik, BTU Cottbus Senftenberg), Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende (Institut für Fahrzeugantriebe, Universität Stuttgart). (Unveröffentlicht).

DANKE

Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. dankt den öffentlichen Fördergebern und allen FVV-Mitgliedern für die großzügige Unterstützung der in diesem Beitrag genannten Forschungsvorhaben. Unser besonderer Dank gilt den Forschungsstellen, Projektleitern und Mitgliedern der Arbeitskreise und projektbegleitenden Ausschüsse für die vertrauensvolle und gute Zusammenarbeit.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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

EFFIZIENZ. ÖKONOMIE. MOBILITÄT.

Sicher in die Zukunft – die Herausforderung bei der Entwicklung von Mobilien Maschinen und Straßennutzfahrzeugen ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Moderne Nutzfahrzeuge langfristig robust und kostengünstig bei einem hohen Wirkungsgrad zu betreiben, gewährleistet einen optimalen Investitionsschutz. ATZheavyduty bietet neuestes Wissen aus Forschung und Entwicklung und berichtet einzigartig über das gesamte Spektrum der Nutzfahrzeugtechnik auf und abseits der Straße. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

ATZ heavyduty
ON- UND OFFHIGHWAY-NUTZFAHRZEUGE



www.mein-fachwissen.de/ATZheavyduty