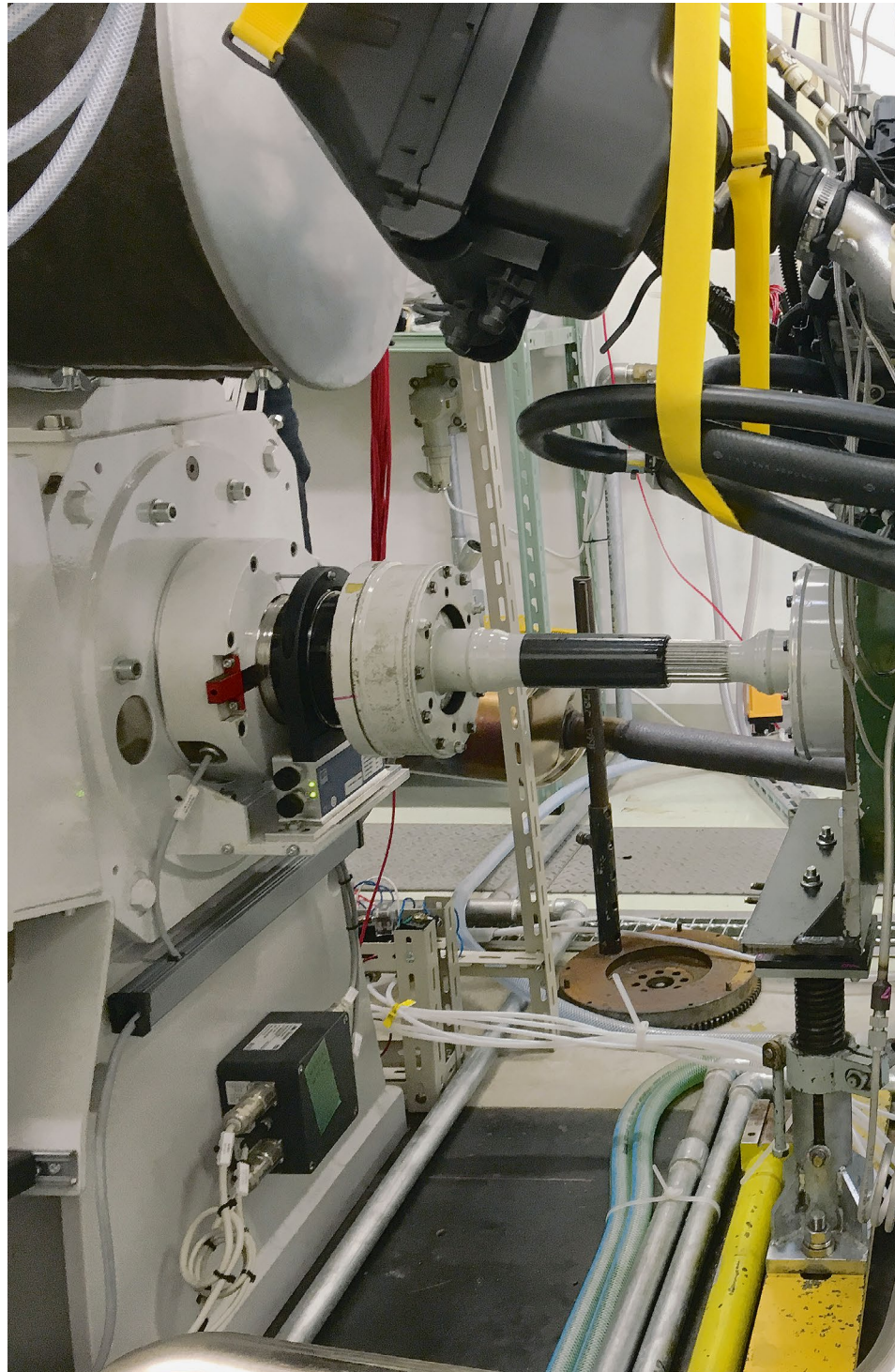


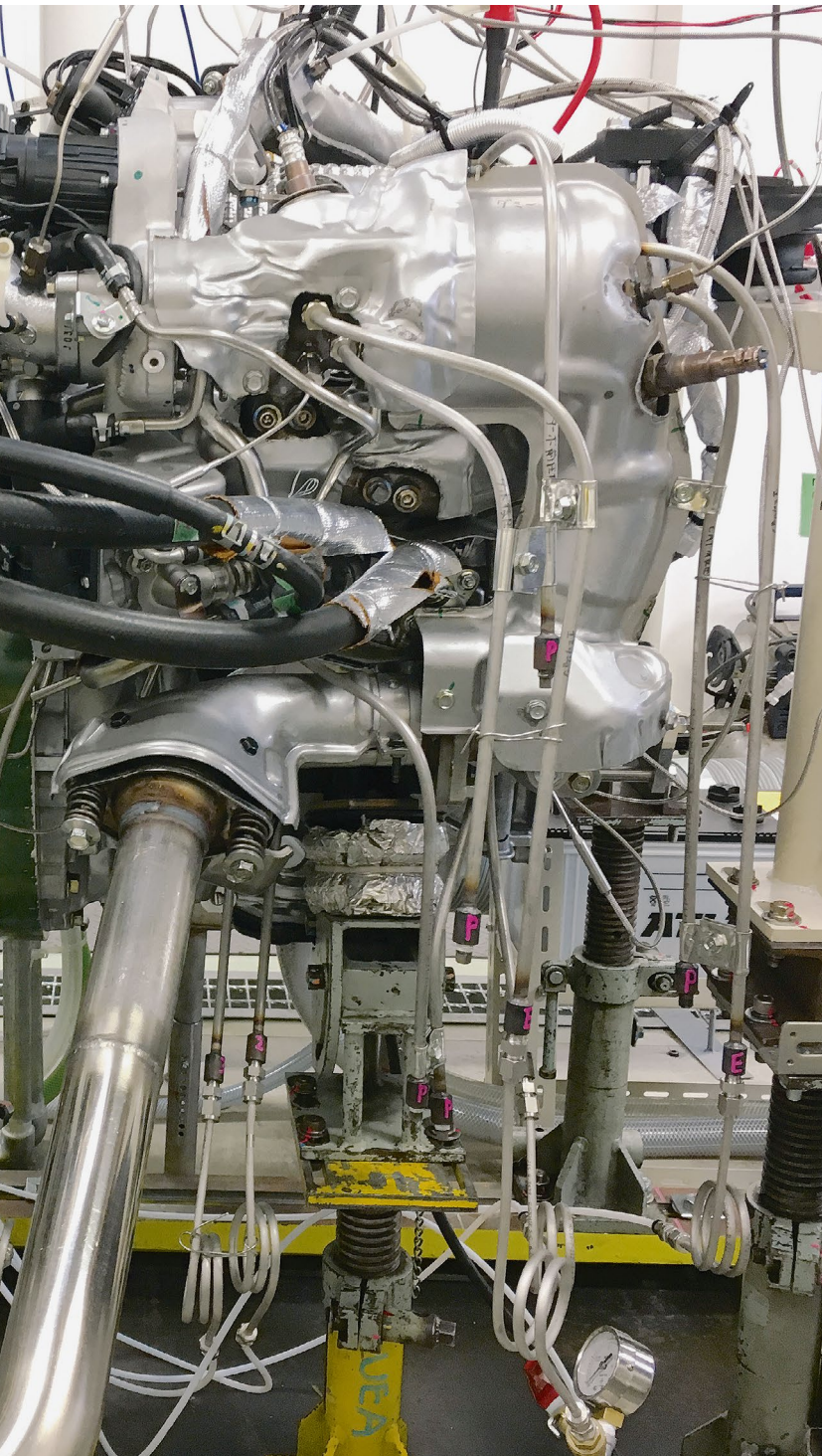
Forschungen am Verbrennungsmotor für eine effektive und wirtschaftliche Emissions- und CO₂-Reduzierung

Verbrennungsmotoren werden auch weiterhin eine tragende Säule der Mobilität sein. Wie die Ergebnisse von FVV-Forschungsprojekten zeigen, können mit technischen Optimierungen und neuen alternativen Kraftstoffen weitere Emissions- und CO₂-Reduzierungen bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

1 WIRTSCHAFTLICH UND GESELLSCHAFTLICH SINNVOLLER UMWELTSCHUTZ

Die Umsetzung der nationalen und internationalen Klimaziele darf nicht zu einer Gefährdung der Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandorts Europa im globalen Umfeld führen. Bei der Auswahl künftiger Antriebskonzepte müssen daher alle Energieträger und -wandler mit Potenzial für eine nachhaltige Defossilisierung gleichermaßen Berücksichtigung finden. Ihr jeweiliger Einsatz muss sich ausschließlich danach richten, welches Konzept für welchen Einsatz den größten Beitrag zum Umweltschutz im Einklang mit wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Anforderungen leisten kann. Die FVV bildet diesen pragmatischen Ansatz über eine breite Mischung von Forschungsprojekten ab, die alle aussichtsreichen Antriebskonzepte berücksichtigt. So liegt bei der thermischen Energieumwandlung im Verbrennungsmotor zum Beispiel ein Forschungsschwerpunkt auf Maßnahmen zur weiteren Reduktion von Emissionen im realen Fahrbetrieb (Real Driving Emissions, RDE). Ein weiterer Schwerpunkt ist der Einsatz alternativer Kraftstoffe, die zu einer verbesserten Klimabilanz im Ver-





© Chiba University

STIMMEN AUS DER FVV



© Porsche

Dr.-Ing. Jonas Villforth ist Entwicklungsingenieur in der Basismotorapplikation & Vorentwicklung Brennverfahren bei der Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG in Weissach.

„Um die komplexen Problemstellungen bei verbrennungsmotorischen Antrieben lösen zu können, sind die wissenschaftlichen Grundlagenforschungen der FVV und die daraus abgeleiteten Entwicklungsmethoden unabdingbar.“



© FVV

Martin Nitsche ist Geschäftsführer des FVV e. V.

„Die Ergebnisse der FVV-Forschungsprojekte sind Entwicklungsgrundlage für künftige Antriebe mit Netto-Null-Emissionen, die unterschiedliche Kundenanforderungen erfüllen und deren Einsatz darüber hinaus ökonomisch tragfähig ist.“



© MAN Truck & Bus

Dr.-Ing. Christian Weiskirch ist Leiter der Hauptabteilung Chassis & Cab Steering bei der MAN Truck & Bus AG in Nürnberg.

„Die Minderung der Emissionen im Realbetrieb wird auch in den nächsten Jahren eine Forschungs- und Entwicklungsaufgabe sein, die durch Einsatz nachhaltiger Energieträger nicht an Relevanz verlieren wird.“



© FVV

Ralf Thee ist Projektmanager des FVV e. V. und Spezialist für nachhaltige Antriebssysteme und alternative Kraftstoffe.

„Die Forschung der FVV liefert elementare Erkenntnisse über weitere Emissionsreduktionspotenziale von erneuerbaren Kraftstoffen, welche wiederum eine signifikante Rolle auf dem Weg zur CO₂-Neutralität des Transportsektors spielen.“



Science for a moving society

kehrssektor beitragen oder sogar zu einer CO₂-Neutralität führen.

2 EMISSIONSREDUZIERUNG BEIM MOTORKALTSTART

Die Abgasreinigung bei Ottomotoren durch den Dreiwegekatalysator erreicht erst dann den vollen Wirkungsgrad, wenn das Abgassystem Betriebstemperatur erreicht hat. Eine einfache und kostengünstige Strategie, die Katalysatorwarmlaufphase bei einem Motorkaltstart zu verkürzen, ist die Nachoxidation von unverbrannten Kraftstoffkomponenten aus einer angefetteten Verbrennung im Abgastrakt vor dem Katalysator. Durch das Vermischen mit in den Abgaskrümmen eingeblasener Frischluft wird die Oxidation von unverbranntem Kohlenstoff (CO), Wasserstoff (H₂) und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (Total Hydrocarbons, THC) gestartet. Die zusätzliche Wärmefreisetzung im Abgaskrümmen beschleunigt das Aufheizen des Katalysators, während der Gesamtbetrieb des Motors stöchiometrisch abläuft.

Im FVV-Forschungsprojekt „Innovative Rohemissionsminderung im Abgaskrümmer“ [1] wurde untersucht, welche Nachoxidationsphänomene durch Einbringung von Sekundärluft in den Abgaskrümmen auftreten können. Dabei sollte die beste Strategie für die Nach-

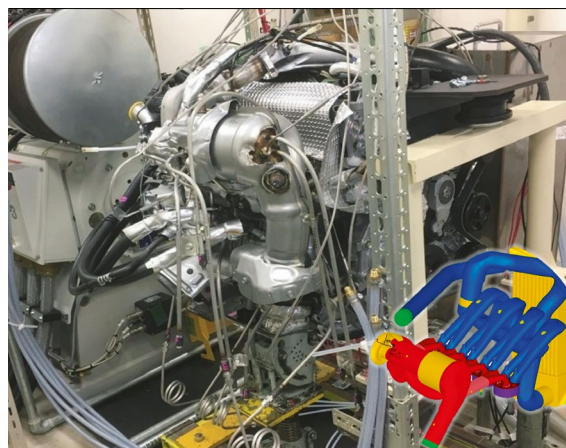


BILD 1 Prüfstands Aufbau und Simulationsmodell mit Motorein- und -auslass (© Chiba University | IFS)

oxidation in der Katalysator-Aufheizphase und deren Anwendung auf ein RDE-Emissionsmodell in der 1-D-Motorsimulation gefunden werden. Das Projekt ist in Zusammenarbeit des Department of Mechanical Engineering der Chiba University in Japan, das für die experimentellen Messungen verantwortlich war, und des Instituts für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart, das die reaktiven Strömungssimulationen durchführte, umgesetzt worden.

In den Versuchsreihen des Projekts wurden verschiedene Motorbetriebspunkte auf einem Prüfstand getestet, wobei die maßgeblichen Betriebspunkte mithilfe von reaktiven Strömungssimu-

lationen analysiert wurden. Diese Simulationen ermöglichten ein besseres Verständnis der Nachoxidationsphänomene und damit detailliertere Emissionsprognosen. Die Motorversuche erfolgten an einem aufgeladenen Vierzylinder-Ottomotor mit Direkteinspritzung. Für die numerische Berechnung verwendeten die Forschenden zwei Simulationsumgebungen. Zunächst berechneten sie mittels eines vollständigen Motormodells einschließlich Turbolader, **BILD 1**, die Parameter für verschiedene Brennpunkte. Danach verfeinerten sie das Abgaskrümmenmodell für eine detaillierte Nachoxidationsanalyse, **BILD 2**. Weitere Untersuchungen konzentrierten sich auf die Optimierung der Nachoxidation durch Verbesserung von Faktoren wie Durchmischung, Temperatur und Verfügbarkeit unvollständiger Verbrennungsprodukte. Darüber hinaus wurden Strategien für die Kraftstoffnacheinspritzung analysiert, wobei sich zeigte, dass der Zeitpunkt der sekundären Einspritzung einen erheblichen Einfluss auf den Nachoxidationsprozess hat: Die Kraftstoffzufuhr vor dem Zündzeitpunkt trug zu einer effektiveren Oxidation bei, während sie nach dem Zündzeitpunkt die Wärmefreisetzung verringerte.

Der Projekterfolg beruht nicht zuletzt auf der Kooperation zwischen der Chiba University und der Universität Stuttgart. Die FVV pflegt einen engen Austausch mit führenden Forschungsstellen in Japan und arbeitet seit mehr als zehn Jahren Hand in Hand mit der Forschungsvereinigung Automotive Internal Combustion Engine Research Association (AICE), die 2014 in Tokio nach dem Vorbild der FVV gegründet wurde.

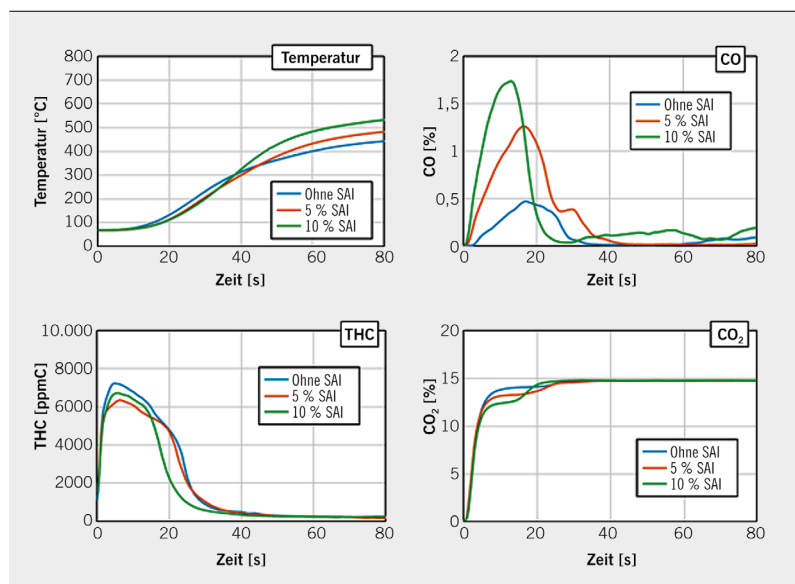


BILD 2 Einfluss der Sekundärlufteinblasung (Secondary Air Injection, SAI) auf die Katalysatoraufheizphase (oben links) und CO-, THC- und CO₂-Kaltstartemissionen (oben rechts bis unten rechts) (© IFS)

3 GERINGERE PARTIKELBILDUNG MIT ALTERNATIVEN KRAFTSTOFFEN

Erneuerbare Kraftstoffe als Energieträger für Verbrennungsmotoren können den CO₂-Ausstoß minimieren. Sie können im Motor entweder in Reinform verwendet oder konventionellen Kraftstoffen beigemischt werden. Durch eine angepasste Formulierung lassen sich die Kraftstoffe zudem so gestalten, dass sie auch die Rußbildung bei der Verbrennung im Motor reduzieren. Da die notwendigen RDE-Tests mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden sind, besteht vonseiten der Industrie großer Bedarf, das Potenzial neuer Kraftstoffe bereits im Vorfeld mithilfe alternativer Verfahren bewerten zu können. Im gemeinsam vom Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und des Instituts OWI Science for Fuels umgesetzten Forschungsprojekt „Kraftstoffzusammensetzung – RDE und Rußbildung“ [2] wurde eine Labormethode zur Bewertung des Einflusses der Kraftstoffzusammensetzung auf das Emissionsverhalten in RDE-Tests entwickelt. Die Forschenden des OWI haben dazu Rußemissionsuntersuchungen an einem stationären Gleichstrombrenner durchgeführt, **BILD 3**.

Dabei wurde unter anderem der Rußindex (Yield Sooting Index, YSI) ermittelt. Der YSI ist ein international etablierter Index, der die intrinsische chemische Neigung einer reinen Verbindung oder eines Brennstoffgemischs charakterisiert, bei Verbrennungsprozessen Rußpartikel zu erzeugen. Die YSI-Ermittlung diente als vorgelagerte Screeningmethode, um vielversprechende Kraftstoffkandidaten für die RDE-Tests zu identifizieren. Die Motorversuche erfolgten auf dem Motorprüfstand des IFKM, **BILD 3**.

Im Rahmen der Analysen wurden die verwendeten Kraftstoffe auf ihre chemischen und physikalischen Spezifika untersucht und diese mit den Ergebnissen aus den Brenner- und Motor- tests zu einem gemeinsamen Datensatz zusammengeführt. Dieser Ansatz macht es möglich, RDE-Emissionen, YSI-Kennwerte und andere Kraftstoffparameter zu korrelieren und Vorhersagen über die Rußemissionstendenz neuer Kraftstoffe zu treffen, **BILD 4**. Im Gegensatz zu den bisher bekannten theoretischen Modellen basiert die im Projekt genutzte Methode auf einer direkten Messung und hat den Vorteil, die ruß-

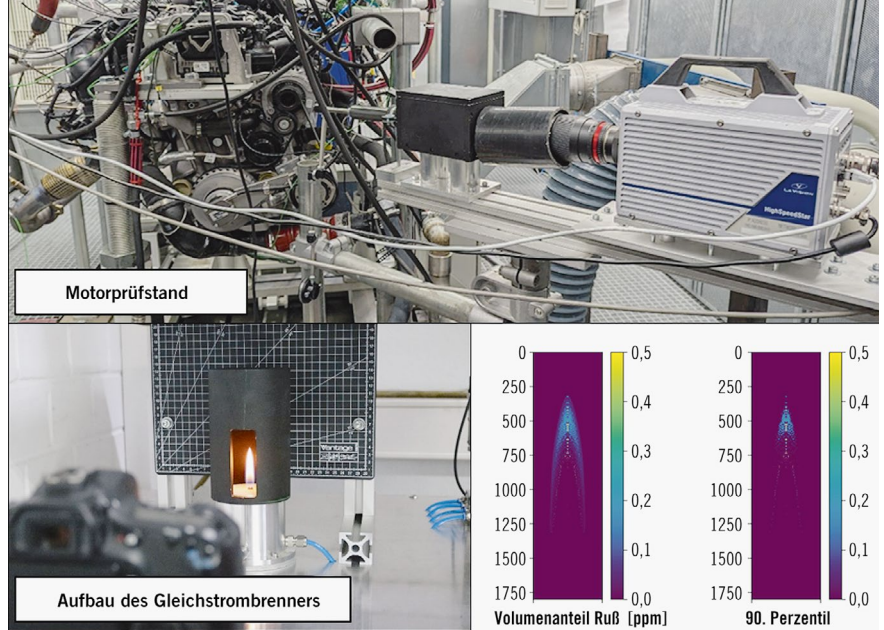
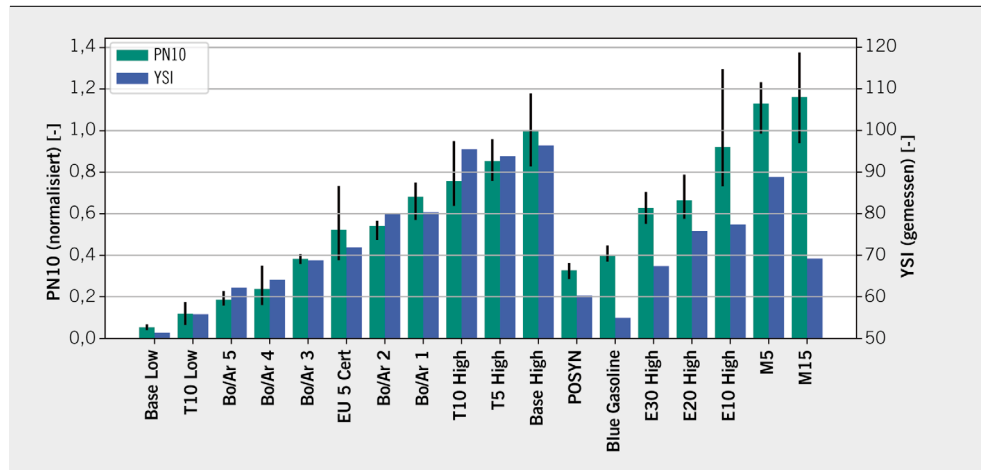


BILD 3 Motorprüfstand (oben); Messaufbau des Gleichstrombrenners (unten links) und Messergebnisse der Rußbildung (unten rechts) (© OWI | IFKM)

BILD 4 Rußemissionstendenz verschiedener Kraftstoffarten (© OWI | IFKM)



bildenden Eigenschaften von Kraftstoffen und Kraftstoffkomponenten in einem realen Verbrennungsprozess zu berücksichtigen. Damit wurde eine robuste und verbrennungsmotorisch relevante Grundlage für die Charakterisierung verschiedener Kraftstoffe geschaffen. Das nun abgeschlossene Forschungsprojekt fokussierte auf die Untersuchung von Kraftstoffen für Ottomotoren. Grundsätzlich ist die Methode jedoch auch für dieselmotorische Kraftstoffe geeignet. Um die Übertragbarkeit des Ansatzes abschließend bewerten zu können, müssen allerdings noch weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

4 OPTIMIERTE GAS-HOCHDRUCK-EINSPRITZUNG UND -VERBRENNUNG

Bei Verbrennungsmotoren für Schwerlast- oder Schiffsanwendungen wird

künftig vermehrt Erdgas statt Diesel als Kraftstoff eingesetzt. Bei vergleichbaren Motorwirkungsgraden bringt das eine CO₂-Reduzierung von etwa 25 % mit sich. Die bei heutigen Erdgasmotoren verbreiteten Magerbrennverfahren mit Dieselpiloteinspritzung oder Vor-kammerzündung führen jedoch zu einem beträchtlichen Methanschlupf, der die CO₂-Vorteile weitgehend aufhebt. Durch eine Hochdruck-Direkteinspritzung (High Pressure Direct Injection, HPDI) von Erdgas in den Brennraum und die Verbrennung in einem Dieselmotus lässt sich Methanschlupf vermeiden, auch lassen sich die Klopfbeschränkungen von vorgemischten Konzepten überwinden. Die schlechten Zündigenschaften von Methan machen dabei jedoch ein zusätzliches Zündsystem erforderlich.

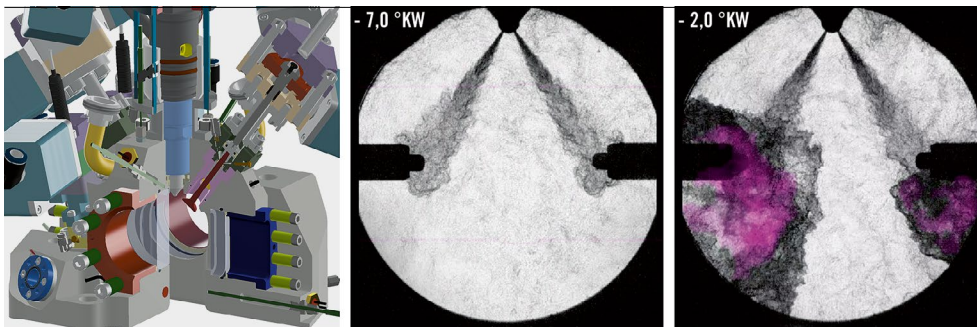


BILD 5 Schematischer Aufbau des Motorprüfstands mit optischem Zugang (links) und Aufnahmen zur Analyse der Zündfähigkeit (rechts) (© FHNW)

Im Projekt „Zündmethoden für nicht vorgemischte Verbrennung bei Hochdruck-Direkteinspritzung von Gas in Schwerlastmotoren“ [3] wurden HPDI-Konzepte untersucht, bei denen ein Zündsystem bei Bedarf die Entflammung der Einspritzstrahlen unterstützt, also wenn sich der Kraftstoff nicht selbst entzündet. Da eine heterogene und möglicherweise selbstgezündete Gasverbrennung ein komplexer Prozess mit vielen interagierenden Einflussfaktoren auf physikalischer und chemischer Ebene ist, wurde das Projekt von drei Instituten bearbeitet, dem Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), der Eidgenössischen Materialprü-

fungsanstalt (Empa) und dem Institut für Thermo- und Fluid-Engineering (ITFE) der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW).

Für die Berechnungen der direkt eingespritzten Methanstrahlen, der Zündung durch Piloteinspritzung und der strahlgeführten Verbrennung entwickelte die Empa im Rahmen des Projekts ein 3-D-Strömungssimulationsmodell. Um die Zündung der Einspritzstrahlen im Experiment herbeizuführen, wurden Glühkerzen und Piloteinspritzungen als Zündhilfe untersucht. Mit Hochgeschwindigkeitskameras und speziell entwickelten Auswertelgorithmen konnten die Forschenden des ITFE das Verhalten des Einspritzstrahls aufzeichnen und damit verfolgen. Für die experimentellen Untersuchungen kamen zwei verschiedene Prüfstände zum Einsatz, ein optischer Motor an der FHNW, **BILD 5**, und ein Einzylindermotor mit 4 l Hubraum am KIT, **BILD 6**. Dabei zeigte sich, dass die Selbstzündung eines Hochdruck-Methanstrahls unter motorüblichen Bedingungen nicht möglich ist. Auf dem Prüfstand wurde daher unter anderem eine Glühkerzenkonfiguration mit geschirmter Hülse bei einer Variation von Parametern wie Einspritzbeginn, Einspritzdruck und Luft/Kraftstoff-Verhältnis (λ) getestet. Die Konfiguration wurde aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem optischen Motor gewählt. Während eine stabile Verbrennung nur innerhalb eines relativ engen Bereichs des Einspritzbeginns erreichbar war, zeigten Variationen von λ , Einspritzdruck und Last keine nennenswerten Einschränkungen der Zündfähigkeit. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse erleichtern die optimale Integration einer Zündvorrichtung für effizientere und umweltfreundlichere Motoren mit Methan-HPDI.

5 FAZIT

Die FVV richtet die Inhalte der Forschungsprojekte so aus, dass sie Ansätze für die Entwicklung aller zukunftsorientierten Antriebssysteme mit Potenzial für eine nachhaltige Verwendung in Europa und weltweit bieten. Im Bereich der Verbrennungsmotoren umfassen die FVV-Projekte beispielsweise Forschungen mit alternativen Kraftstoffen zur Reduzierung des CO_2 - und Emissionsfußabdrucks und der RDE-Emissionen. Mithilfe der Forschungsergebnisse können die FVV-Mitgliedsfirmen ihre Entwicklungen schneller und wirtschaftlicher umsetzen und nachhaltige Lösungen auch für Anwendungen anbieten, die derzeit noch nicht elektrifizierbar sind.

LITERATURHINWEISE

- [1] FVV-Forschungsvorhaben „Innovative RDE Rohemissionsminderung im Abgastrakt.“ Projektleitung: Dr.-Ing. Jonas Villforth (Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. André Casal Kulzer (IFS, Universität Stuttgart), Prof. Dr. Yasuo Moriyoshi (Department of Mechanical Engineering, Chiba University, Japan)
- [2] FVV-Forschungsvorhaben „Methodenentwicklung zur Bewertung des Einflusses der Zusammensetzung (alternativer) Kraftstoffe auf das Emissionsverhalten in Real-Driving-Emissions (RDE).“ Projektleitung: Dr. Jan-Hubert Wittmann (Freyberger engineering GmbH). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch (IFKM, KIT), Dr. Wilfried Plum (OWI Science for Fuels gGmbH)
- [3] FVV-Forschungsvorhaben „Zündmethoden für nicht vorgemischte Verbrennung bei Hochdruck-Direkteinspritzung von Gas in Schwerlastmotoren.“ Projektleitung: Vladyslav Sazonov (Woodward-L'Orange GmbH). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr. Kai Herrmann (ITFE, FHNW), Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch (IFKM, KIT), Christian Bach (Chemical Energy Carriers and Vehicle Systems Laboratory, Empa)

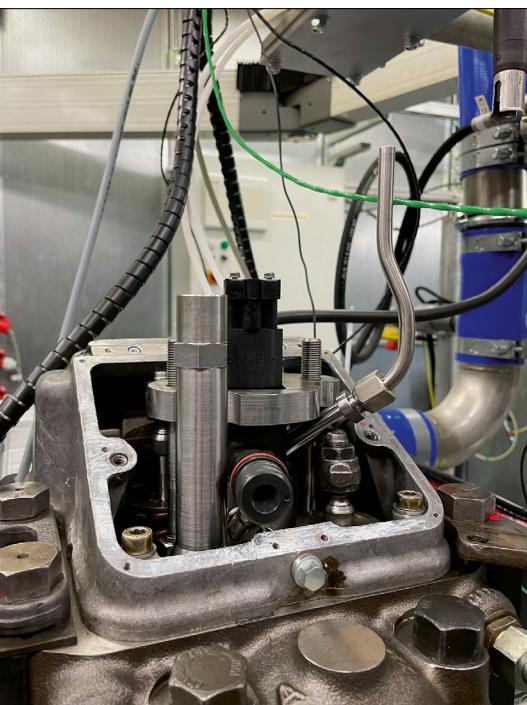


BILD 6 Modifizierter Zylinderkopf mit Hochdruck-Erdgasinjektor (© KIT)



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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