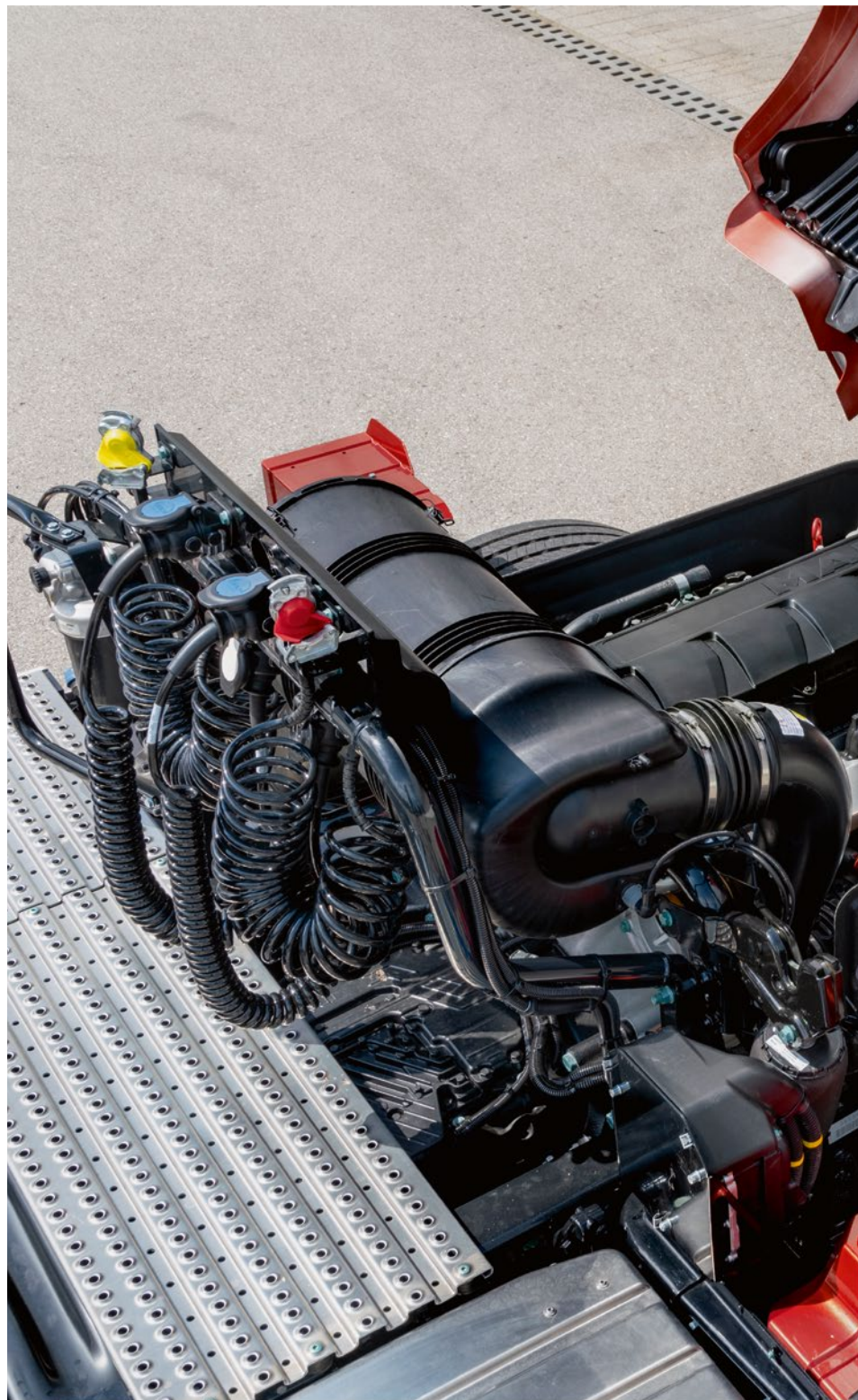


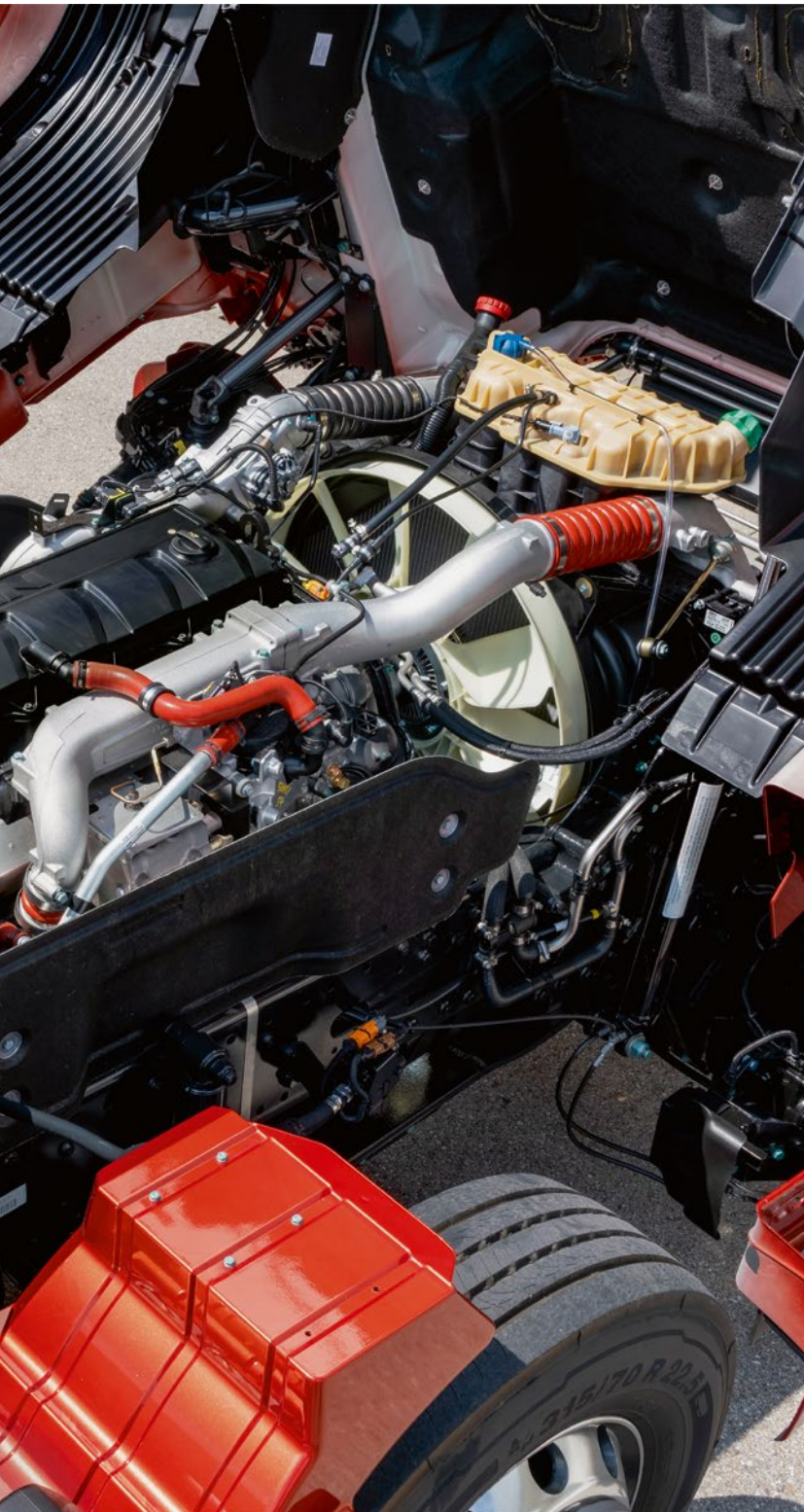
# Zukunftsorientierte Forschung an Motoren mit Selbstzündung

Aufgrund des sehr guten Wirkungsgrads hat sich der Dieselmotor in vielen kommerziellen Anwendungen eine führende Rolle erarbeitet. Neue Technologien wie künstliche Intelligenz oder additive Fertigung können helfen, erhöhte Anforderungen an Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erfüllen. Die wissenschaftlichen Grundlagen werden in Vorhaben der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) erarbeitet und können von deren Mitgliedsunternehmen in die Praxis überführt werden.

## 1 ZIELSETZUNG

Seit ihrer Gründung im Jahr 1956 koordiniert die FVV Forschung an Verbrennungsmotoren mit Selbstzündung. Während Projekte, die sich mit dem Dieselmotor beschäftigen, früher in der Planungsgruppe „Thermodynamik“ geführt wurden, sind sie seit 2017 in einer eigenen Planungsgruppe beheimatet. Diese Entwicklung ist nicht nur Resultat eines erheblichen Wachstums der Projektanzahl, sondern auch Ausdruck einer sich verändernden Rolle des Dieselmotors – zunehmend wird er aufgrund seiner Leistung im Vergleich zu anderen Energiewandlern wieder schwerpunktmäßig in Nutzfahrzeugen, Arbeitsmaschinen sowie in stationären Anwendungen eingesetzt. Im professionellen Einsatz, in dem es auf höchste Effizienz, Robustheit und Wirtschaftlichkeit bei gleichzeitig hohen Dauerauslastungen ankommt, können durch die Nutzung grundlegend neuer Technologien weitere bedeutende Fortschritte erzielt werden. Die vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung in der FVV





© MAN Truck & Bus

## STIMMEN AUS DER FVV



© Traton

**Dr.-Ing. Christian Weiskirch leitet in der Traton SE in München die Antriebsstrangentwicklung. Im FVV-Forschungsbereich Motoren koordiniert er die Planungsgruppe 3 „Selbstzündung“.** „Klimaneutrale Antriebe mit Emissionen an der Nachweisgrenze benötigen eine engagierte und anwendungsorientierte Forschungsplattform, wie sie die FVV bietet.“



© KIT

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Koch leitet das Institut für Kolbenmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie, das als Forschungsstelle viele FVV-Vorhaben unterstützt.** „Synthetische Kraftstoffe, in Kombination mit der Hybridisierung und der kontinuierlichen Weiterentwicklung im Detail, sind wesentliche Aufgaben der Antriebsforschung der nächsten Jahrzehnte.“

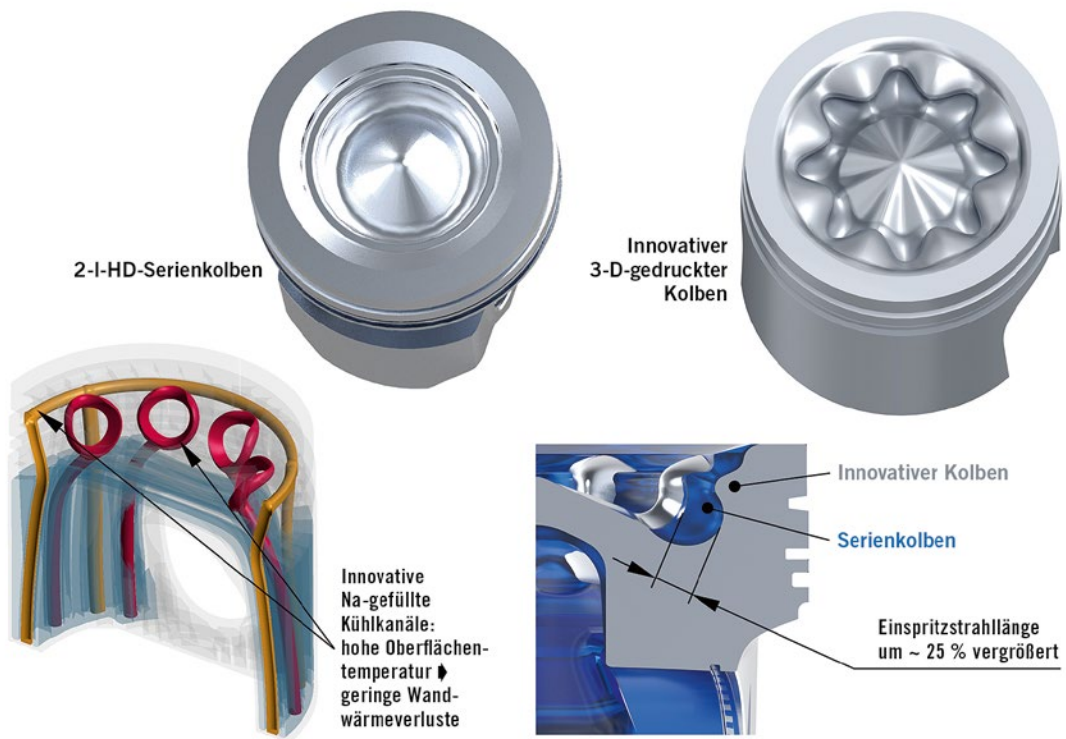


© IAV

**Dr.-Ing. Reza Rezaei leitet die Vorentwicklung für Nutzfahrzeugantriebe der IAV GmbH in Gifhorn.** „Wasserstoff ist ein Energieträger mit Zukunft. Innerhalb der FVV erforschen wir die Wasserstoffverbrennung als ein Puzzlestück der nachhaltigen Mobilität.“



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



**BILD 1** Muldengeometrie und Kühlkanalgestaltung eines Serien- und eines additiv gefertigten Kolbens im Vergleich (© IAV)

trägt dazu bei, neue Erkenntnisse auch kleineren und mittleren Unternehmen (KMU) zu erschließen.

Die Forschungsschwerpunkte verlagern sich von der Aufklärung grundlegender technischer Fragestellungen, zum Beispiel im Bereich der Brennverfahrensauslegung, hin in Richtung einer Gesamtsystemoptimierung des Antriebs unter den Aspekten Kraftstoffverbrauch und Emissionen. Im Mittelpunkt der Untersuchungen müssen die von der Gesetzgebung geforderten CO<sub>2</sub>-Ziele stehen, perspektivisch sogar eine vollständige Klimaneutralität. Da dies mit Verbrennungskraftmaschinen nur durch den Verzicht auf fossile Kraftstoffe zu erreichen ist, gewinnt die Interaktion von Antrieb und Energieträger als Forschungsthema an erheblichem Gewicht.

## 2 EINSATZ VON KI IN DER MOTORENENTWICKLUNG

Ambitionierte CO<sub>2</sub>-Ziele oder gar Technologiesprünge in Richtung Klimaneutralität sind mit einem hohen Entwicklungsaufwand verbunden. Angesichts der zunehmenden Komplexität entfällt ein immer größerer Anteil dieses Aufwandes auf die Validierung sowohl der Messungen auf Prüfständen als auch der Gesamtfahrzeugmessungen. Nutzfahr-

zeug- oder Großmotoren müssen mit einer langen Betriebsstundendauer laufen, um valide Aussagen zu einem langzeitstabilen Emissionsverhalten treffen zu können. Hinzu kommen erhebliche Datenmengen aus dem realen Betrieb über online vernetzte Fahrzeuge und Aggregate, die prinzipiell wichtige Informationen für die Entwicklung nachfolgender Antriebsgenerationen enthalten können. Um große Datenmengen schneller auswerten zu können, bietet sich der Einsatz von Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) an.

Um die grundsätzliche Anwendbarkeit zu prüfen, startet die FVV das Forschungsvorhaben „KI-Integration im Rahmen der Entwicklungs-Toolkette“ [1]. Die Methodik hier soll an einem hybridisierten Dieselmotor validiert werden, da ein solcher Antriebsstrang voraussichtlich die größte Herausforderung hinsichtlich seines transienten Emissionsverhaltens darstellt. Eine wesentliche Rolle für das selbstverstärkende Lernen (Reinforcement Learning, RL) spielt dabei die Erstellung eines Algorithmus, der übergreifend in verschiedenen Entwicklungsphasen eingesetzt werden soll. Im Rahmen einer Potenzialanalyse soll zudem untersucht werden, inwieweit KI für die adaptive Regelung hybrider Antriebssysteme im Betrieb sinnvoll wäre.

## 3 NEUE PRODUKTIONSMETHODEN

Der Bereich, in dem für ein Serienprodukt ein Systemoptimum erzielt werden kann, ist immer durch die Produzierbarkeit der Systemkomponenten begrenzt, wobei die Produktion einer Neuentwicklung nicht nur grundsätzlich technisch möglich, sondern auch wirtschaftlich darstellbar sein muss. Innovative Herstellungsverfahren wie der 3-D-Druck ermöglichen es grundsätzlich, Bauteile mit neuartigen Formen zu realisieren. Die erhöhte Freiheit in der Formgebung kann nicht nur die Effizienz der Verbrennungsmotoren verbessern, sondern auch zur Adaption an innovative Betriebsstoffe dienen, die im Hinblick auf die Erfüllung künftiger strengerer Grenzwerte für Stickoxide oder CO<sub>2</sub>-Emissionen relevant sind.

Ein Beispiel für das Einbeziehen neuer Produktionsmethoden stellt das FVV-Projekt „Innovative HD-Brennverfahrensauslegung“ dar [2]. Das in der interdisziplinären Zusammenarbeit von drei Forschungsstellen bearbeitete Vorhaben beruht auf der Erkenntnis, dass der Brennverlauf wesentlich von der Kolbenmuldenform, **BILD 1**, beeinflusst wird. Neue additive Fertigungsverfahren erlauben grundsätzlich neue Freiheitsgrade in der Kolbenkonstruktion,

sowohl was die Muldengestaltung als auch die Kühlkanäle im Kolbenboden betrifft. Innerhalb des Mitte 2019 gestarteten Vorhabens werden verschiedene additiv hergestellte Kolbengeometrien auf einem Einzylinder-Forschungsmotor untersucht und eine Geometrieoptimierung mithilfe numerischer Verfahren durchgeführt. Zudem soll untersucht werden, inwieweit von der Formgebung her völlig neue Muldenformen die Gemischbildung verbessern und deren Emissionen verringern können. Der Einfluss von Natriumkühlkanälen auf die Wandtemperatur, die Wandwärmeverluste und den Kraftstoffverbrauch wird ebenfalls numerisch und experimentell analysiert.

#### 4 BETRIEB MIT KLIMANEUTRALEN KRAFTSTOFFEN

Vor dem Hintergrund der weltweiten CO<sub>2</sub>-Ziele ist langfristig eine völlige Abkehr von fossilen Energieträgern zu erwarten – einzelne Nutzfahrzeughersteller haben sich selbst bereits Ziele für vollständige Klimaneutralität gesetzt. Um diese zu erreichen, könnten speziell für die Güter-Langstreckenmobilität klimaneutrale Kraftstoffe in den Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Die FVV hat daher bereits in den vergangenen Jahren die Forschung an der Interaktion synthetischer Kraftstoffe mit dem Motor intensiviert, wobei sowohl Beimischungen als auch Reinkraftstoffe betrachtet wurden [3].

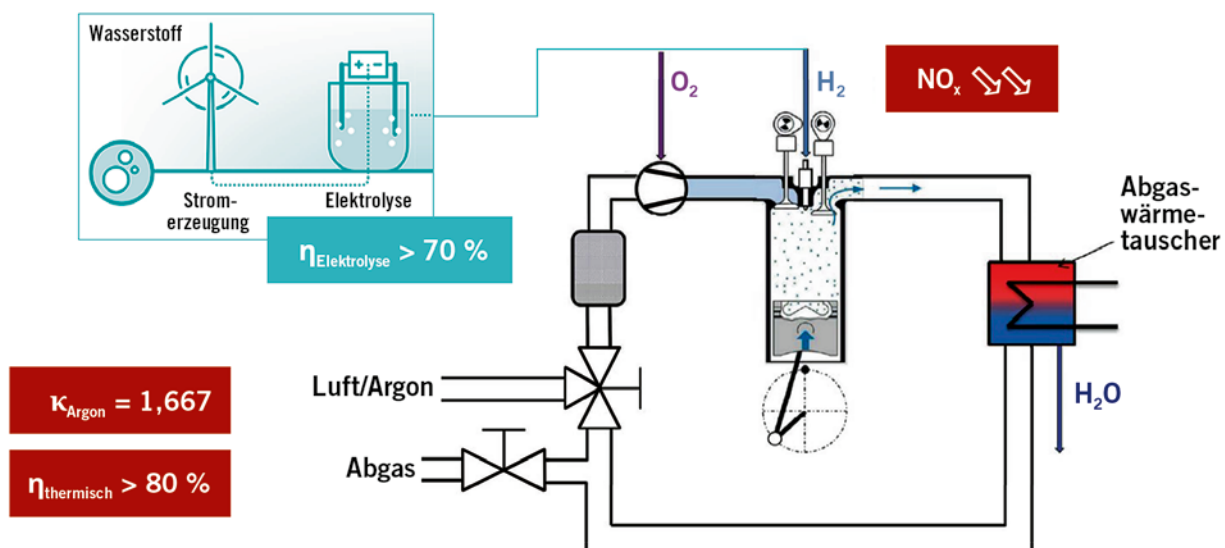
Am Anfang der Erzeugungskette für solche synthetischen Kraftstoffe steht fast immer sogenannter grüner Wasserstoff, der mithilfe von erneuerbaren Energien gewonnen wird. Aus diesem Grund arbeitet die FVV nun auch an den grundlegenden Prinzipien der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff in einem sogenannten kalten Verbrennungsprozess in der Brennstoffzelle in einer neuen eigenen Planungsgruppe [4].

Das Potenzial der Wasserstoffverbrennung in einem selbstzündenden Hubkolbenmotor untersucht die FVV in einem neuen Forschungsvorhaben [5]. Leitende Idee ist dabei, anstelle von Umgebungsluft ein inertes Arbeitsmedium zu verwenden, in dem die reagierenden Gase (Sauerstoff und Wasserstoff) aktiv in einem geschlossenen Arbeitsgaskreislauf mitgeführt werden, **BILD 2**. Dadurch lassen sich die bei der Verwendung von Umgebungsluft entstehenden Stickoxidroh-emissionen vermeiden. Insbesondere soll innerhalb des Vorhabens untersucht werden, inwieweit eine Rückverstromung bei hocheffizienten Verbrennungsmotoren wirtschaftlich überhaupt sinnvoll ist, um zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen zu können. Das Vorhaben dient der Potenzialanalyse des Brennverfahrens, der Auswahl des geeigneten inertes Trägermediums sowie der grundsätzlichen Dimensionierung.

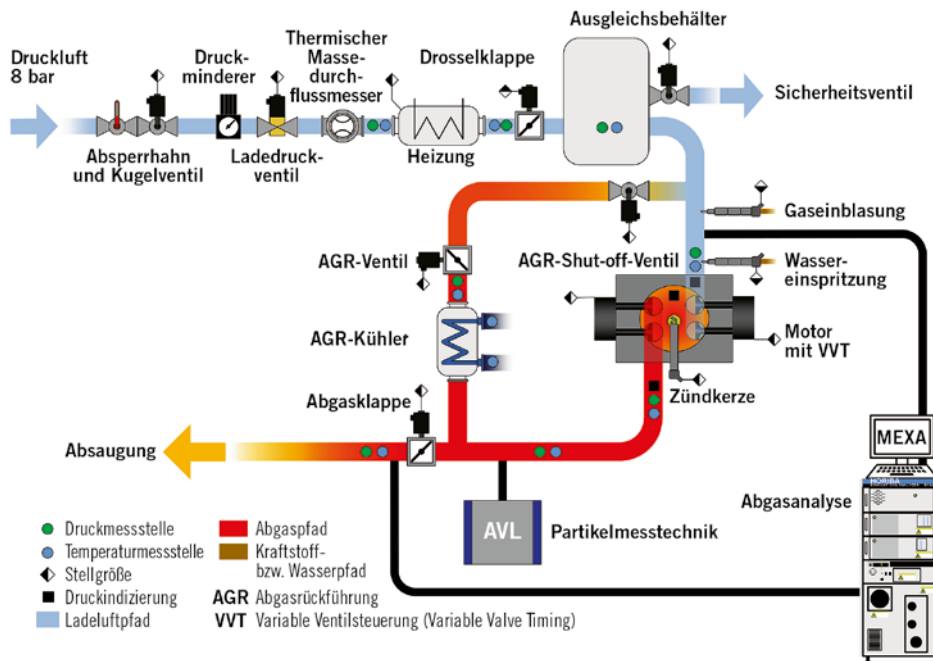
#### 5 TECHNOLOGIETRANSFER ZUM GASMOTOR

Die Verbrennung von Methan setzt erheblich geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen in g/kWh frei als der Betrieb mit Otto- oder Dieselmotoren. Zudem kann synthetisches Methan mit verhältnismäßig geringen Wandlungsverlusten aus grünem Wasserstoff hergestellt werden [6], was wiederum einen klimaneutralen Betrieb von Motoren und Gasturbinen ermöglicht. Für mobile Anwendungen im Schwerlastverkehr stellen dabei die Wirtschaftlichkeit sowie die lokal von den Behörden zunehmend geforderte Emissionsfreiheit große Herausforderungen dar. Gasmotoren müssen, wenngleich fremdgezündet, einen ähnlichen Zielkonflikt zwischen Effizienz und Emissionsabsenkung bewältigen, wie dies von Diesellaggregaten bekannt ist.

Anhand einer Reihe von aufeinander aufbauenden Forschungsvorhaben zur Luftpfadvariabilität, die von der FVV in den letzten 20 Jahren koordiniert wurde, lässt sich zeigen, dass ein Technologietransfer vom Diesel- auf den Gasmotor möglich ist. In einem 2003 gestarteten Projektcluster wurde das Emissionsminderungspotenzial der homogenen Dieselverbrennung sowohl für Pkw- als auch für Nutzfahrzeugmotoren untersucht. Für die Nutzfahrzeuganwendung ergab sich, dass ein variables Verdichtungsverhältnis notwendig ist, um den sonst nur ein-



**BILD 2** Schematische Darstellung der Wasserstoffverbrennung mithilfe eines inertes Trägermediums, Quelle: Ehrler, T.: Zero-Emission-Kreislaufmotor zur Rückverstromung von grünem Wasserstoff, Dessauer Gasmotoren-Konferenz 2019 (© Winterthur Gas & Diesel)



**BILD 3** Prinzipieller Versuchsaufbau für die Untersuchung eines stöchiometrisch betriebenen Nutzfahrzeug-Gasmotors mit AGR und Wassereinspritzung (© TU Braunschweig)

geschränkt nutzbaren Lastbereich der homogenen Dieselverbrennung auf eine realistische Größe auszuweiten. Als probateres Mittel gegenüber der geometrischen Verdichtungsverhältnisänderung zeigte sich die Variation des thermodynamischen Verdichtungsverhältnisses mit variabler Ventilsteuerung. Unter anderem auf dem in diesen Pilotprojekten erarbeiteten Wissen basierend untersuchte die Technische Universität Braunschweig in zwei aufeinander aufbauenden Vorhaben den Einsatz von Luftpfadvariabilitäten an Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. Sie schuf damit ein grundlegendes Verständnis für den Einfluss von Ventilsteuerzeiten auf das Effizienz- und Emissionsverhalten [7]. Aus sich ändernden Randbedingungen und neuen Erkenntnissen können sich also innerhalb der FVV-Vorhaben andere neue Forschungsschwerpunkte ergeben – so ist hier von einer das Brennverfahren steuernden Technologie auf ein effizienteres Temperaturmanagement des Motors umgeschwenkt worden.

In einem Anfang 2019 gestarteten dritten Vorhaben „Potenziale von Luftpfadvariabilitäten am Nutzfahrzeug-Gasmotor“ wird nun untersucht, wie eine vollvariable Ventilsteuerung genutzt werden kann, um den prinzipiellen Wirkungsgradnachteil eines stöchio-

metrischen Gasmotors gegenüber einem Dieselmotor zu minimieren [8]. Durch Prüfstandsversuche, **BILD 3**, soll der Nachweis erbracht werden, dass Miller-Steuerzeiten sowohl die Drosselverluste im Teillastbereich vermindern als auch die Klopfgrenze bei Volllast erhöhen können. Darüber hinaus wird die Kombination des variablen Ventiltriebs mit Abgasrückführung und Wassereinspritzung untersucht. Im Idealfall könnte ein solcher Gasmotor trotz der stöchiometrischen Verbrennung annähernd die Effizienz eines Dieselmotors erreichen, dabei aber einen geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß aufweisen.

### 6 FAZIT

Aufgrund der hohen Energiedichte von gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen werden Verbrennungsmotoren auch in absehbarer Zukunft eine große Rolle im Bereich der Langstrecken- und Gütermobilität sowie im Einsatz als stationäre Energiewandler spielen. Ein CO<sub>2</sub>-neutraler Betrieb mit grünem Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen ist grundsätzlich möglich, in Anbetracht höherer Herstellkosten muss aber eine Gesamtsystemoptimierung im Fokus der Forschungen bleiben. Motoren mit Selbstzündung können also, wo immer

es möglich ist, eingesetzt werden, soweit der Schadstoffausstoß weiter gesenkt und die Effizienz weiter gesteigert wird.

Wesentliche Effizienzpotenziale können ermittelt werden durch den Einsatz neuer Technologien wie KI oder additive Fertigung. Zudem sind innovative Brennverfahren und die Weiterentwicklung bestehender Technologien wie zum Beispiel der variablen Ventiltriebsteuerung auf dem Weg zur Emissionsfreiheit und Klimaneutralität unverzichtbar. Mit der vorwettbewerblichen Gemeinschaftsforschung schlägt die FVV die Brücke zwischen Wissenschaft und Anwendung und sichert auf diesem Weg die Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der Verbrennungskraftmaschinen.

### LITERATURHINWEISE

- [1] IGF-Forschungsvorhaben „Methodenentwicklung zur Integration von Künstlicher Intelligenz (KI) im Rahmen der heutigen Entwicklungs-Toolkette am Beispiel hybridisierter Antriebskonzepte mit Dieselmotor“. (Unveröffentlicht)
- [2] IGF-Forschungsvorhaben „Innovative Nfz-Diesel-Brennverfahrensauslegung mittels des 3D-Druckverfahrens“. (Unveröffentlicht)
- [3] Tutsch, P.: Forschung an der Wechselwirkung von Verbrennungskraftmaschine und Kraftstoff. In: MTZ 79 (2018), Nr. 1, S. 56 ff.
- [4] Tutsch, P.: Industrielle Gemeinschaftsforschung auf dem Gebiet der Brennstoffzelle. In: MTZ 78 (2017), Nr. 9, S. 71 ff.
- [5] IGF-Forschungsvorhaben „Potentialanalyse eines selbstgezündeten Wasserstoffmotors im geschlossenen Arbeitsgas-Kreislauf“. (Unveröffentlicht)
- [6] Kramer, U.; Ortloff, F.; Stollenwerk, S.: Defossilisierung des Transportsektors : Optionen und Voraussetzungen in Deutschland. In: FVV (Hrsg.): FVV-Schriftenreihe R586, S. 26-31, 2018
- [7] IGF-Forschungsvorhaben „Potential von Luftpfadvariabilitäten am Nfz-Motor zur Leistungssteigerung bei Optimierung des Schadstoff- und des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes“ I+II. Fördergeber: BMWi/AiF (17080-N + 18762-N). In: FVV (Hrsg.): Tagungsband R584, S. 165-200, Frankfurt am Main, 2018
- [8] IGF-Forschungsvorhaben „Potenziale von Luftpfadvariabilitäten für zukünftige Nfz-Gas-Motoren zur Effizienzsteigerung und Emissionsabsenkung“. (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