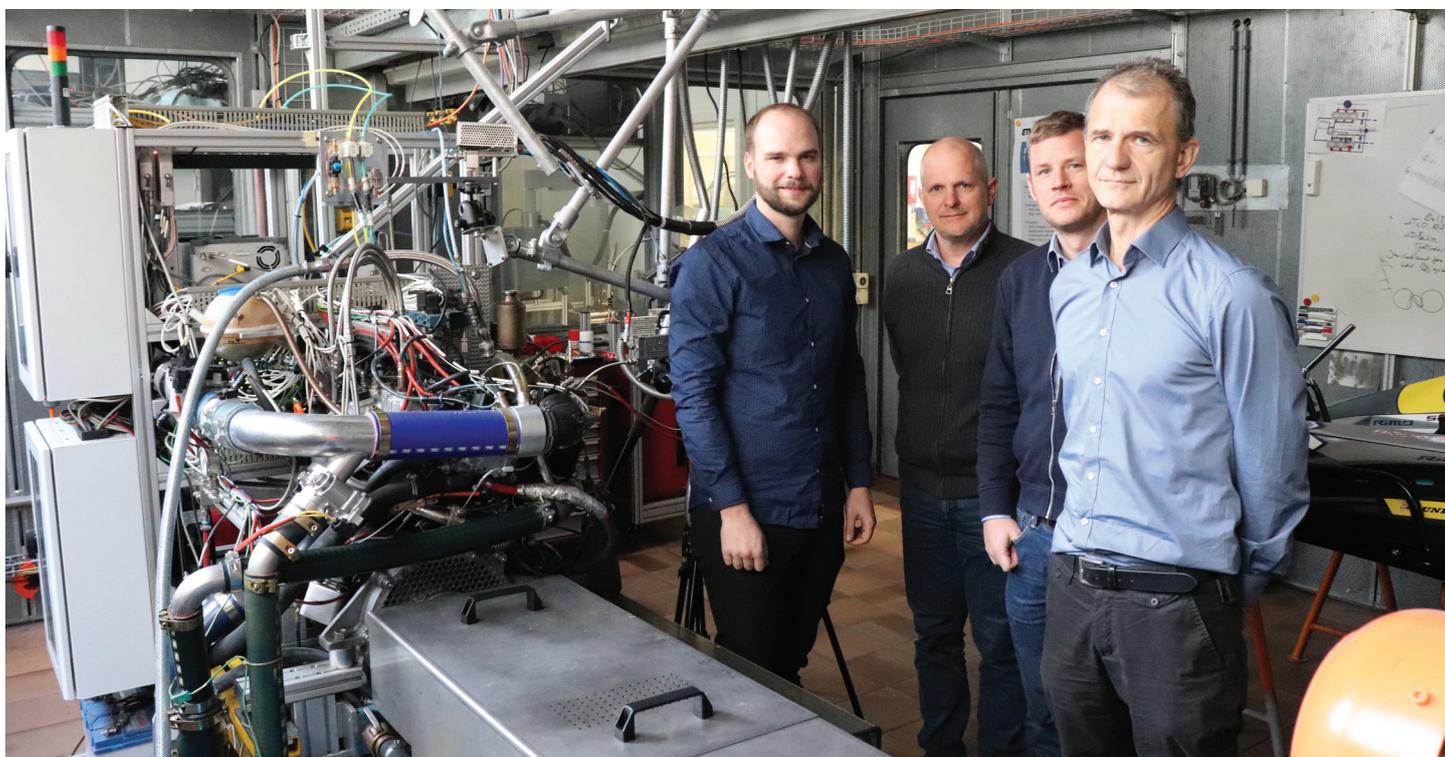


EIN MOTOR GEMACHT FÜR ERNEUERBARE TREIBSTOFFE

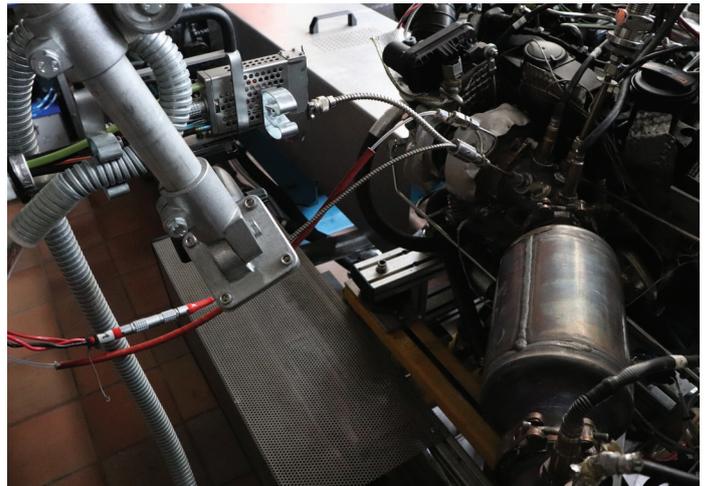
Auf der Elektromobilität ruhen grosse Hoffnungen. Ergänzend können aber auch effiziente und möglichst umweltgerechte Verbrennungsmotoren einen Beitrag zu einer nachhaltigen Mobilität leisten. Das gilt nicht zuletzt für den Transportsektor sowie im Flug- und Schiffsverkehr, wo die Elektromobilität aus heutiger Sicht nur in Nischenanwendungen umsetzbar ist. Vor diesem Hintergrund gingen drei Forscherteams von ETH Zürich und Empa in einem interdisziplinären Projekt der Frage nach, wie Verbrennungsmotoren fit gemacht werden können für den Einsatz von erneuerbaren, CO₂-neutralen Treibstoffen, die aus biogenen Quellen stammen («Biotreibstoffe») oder mit regenerativem Strom synthetisch erzeugt werden («e-fuels»). Wichtige Ergebnisse werden unterdessen in Kooperation mit Industriepartnern praxisnah umgesetzt.



Projektteam vor dem NextICE-Motorenprüfstand an der ETH Zürich (v.l.n.r.): Richard Hutter (ETH Zürich/IDSC), Dr. Patrik Soltic (Empa-Abteilung Fahrzeugantriebssysteme unter der Leitung von Christian Bach), Dr. Christophe Barro (LAV der ETH Zürich unter der Leitung von Prof. Konstantinos Boulouchos), Prof. Christopher Onder (Leiter des Instituts für dynamische Systeme und Regelungstechnik/IDSC an der ETH Zürich). Foto: B. Vogel

Mit einem Marktanteil von 1,6% führen Biotreibstoffe in der Schweiz ein Nischendasein. Zum Einsatz kommen erneuerbare Treibstoffe in Form von Biodiesel (v.a. als 7%-Beimischung zu Diesel) und Bioethanol (v.a. als 5%-Beimischung zu Benzin). Daneben fahren gasbetriebene Autos mit Biomethan, und einige Bauern befüllen ihre Traktoren mit Pflanzenöl, vor allem Rapsöl. Die in der Schweiz eingesetzten Biotreibstoffe stammen überwiegend aus tierischen oder pflanzlichen Abfall- und Reststoffen. Länder wie die USA oder Brasilien kultivieren dagegen in grossem Stil Energiepflanzen. Auch der in Europa verbreitete «Rapsdiesel» wird aus der Rapspflanze hergestellt (unter Beigabe von Methanol).

Wegen der Konkurrenzierung der Nahrungsmittelproduktion lehnen die Gegner Biotreibstoffe strikt ab. Die Befürworter dagegen sehen in ihnen einen wichtigen Ansatz zum Ersatz fossiler Treibstoffe und als Schritt hin zu einer CO₂-neutralen Mobilität. Die Befürworter machen geltend, Biotreibstoffe liessen sich auch ohne Verwendung von Nahrungspflanzen herstellen. Das ist unter anderem der Fall, wenn Klärschlamm oder landwirtschaftliche Abfälle zu Biogas fermentiert und dann zu Biomethan veredelt werden. Oder wenn man einen synthetischen Treibstoff wie OME einsetzt (vgl. Textbox), den man – zum Beispiel – aus CO₂, Wasser und erneuerbarem Strom herstellen kann, oder regenerativ erzeugtes Methan. Mit solchen Treibstoffen, so die Hoffnung der Befürworter, könnte die Vision eines CO₂-neutralen Verbrennungsmotors Realität werden.



Detailaufnahme des NextICE-Motorenprüfstands an der ETH Zürich: Die Kabel führen zu einer Messsonde, mit der unverbranntes Methan gemessen wird. Die Beseitigung der Schadstoffe erfolgt im Drei-Wege-Katalysator rechts im Bild. Foto: B. Vogel

Lockere Zusammenarbeit von drei Forschungsinstituten

Vor diesem Hintergrund führten Wissenschaftler der ETH Zürich und der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa in Dübendorf (ZH) von 2014 bis 2018 das Projekt NextICE durch. Sein Fokus lag auf der Frage, wie ein künftiger Verbrennungsmotor (engl. Internal Combustion Engine/ICE) aussehen muss, der für den Betrieb mit erneuerbaren Treibstoffen ausgelegt ist. «Verbrennungsmotoren sind bisher für fossile Kraftstoffe wie Benzin und Diesel optimiert

EIN TREIBSTOFF NAMENS OME

OME (Polyoximethyldimethylether) ist als sauberer (sprich: CO₂-neutraler) Ersatz für Dieselkraftstoff im Gespräch. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, muss OME ohne fossile Ressourcen und unter Verwendung von erneuerbarem Strom hergestellt werden (z.B. Synthesegas aus CO₂ und Wasser unter Einsatz von erneuerbaren Energien; oder aber aus nachwachsenden Rohstoffen).

OME ist nicht leicht flüchtig und leicht entzündlich wie Diesel, enthält aber Sauerstoff. Dies ist Vor- und Nachteil zugleich: Ein Vorteil ist, dass der im Treibstoff enthaltene Sauerstoff die Russbildung praktisch verhindert und dadurch einen Betrieb ohne Sauerstoffüberschuss erlaubt (stöchiometrisch wie beim Benziner, im Gegensatz zur mageren Verbrennung beim Diesel). Dies wiederum ermöglicht die Nutzung eines kompakten 3-Wege-Katalysators. Ein weiterer Vorteil: OME ist flüssig und könnte somit in Zukunft gut über die bestehende Tankstellen-Infrastruktur verteilt werden. Der Nachteil: Wegen des Sauerstoffgehalts hat OME eine geringere Energiedichte, erfordert für die gleiche Fahrleistung also einen grösseren Tank.

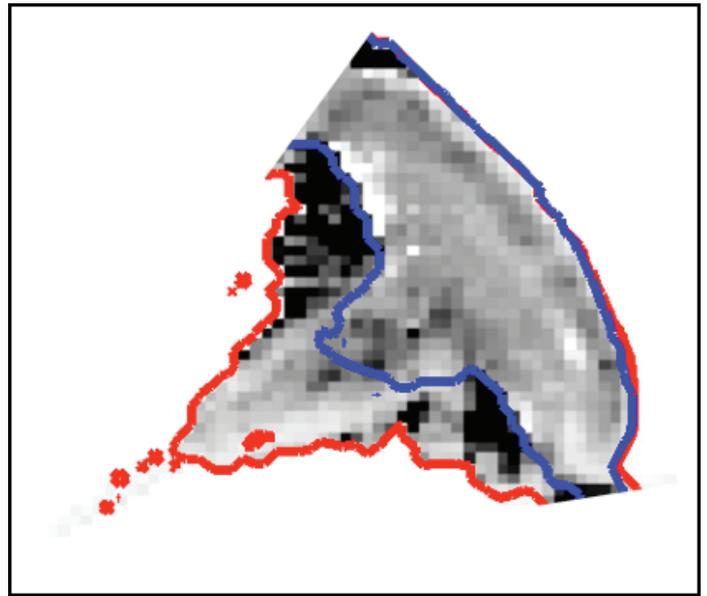
OME kann allein als Treibstoff in einem Dieselmotor verwendet werden – oder dem Diesel in kleinen Mengen beigemischt werden. Dritte Möglichkeit: Man verwendet OME in einem Zündstrahl-Motor, bei dem Methan (Erdgas) vom Diesel-ähnlichen OME gezündet wird. BV

worden. Wenn wir sie künftig mit erneuerbaren Treibstoffen betreiben wollen, müssen wir den Verbrennungsmotor neu konzipieren – das betrifft die eingesetzten Brennverfahren und Regelungstechniken, aber auch die mechanische Konstruktion des Motors», sagt Prof. Christopher Onder, ETH-Professor und Leiter des NextICE-Projekts.

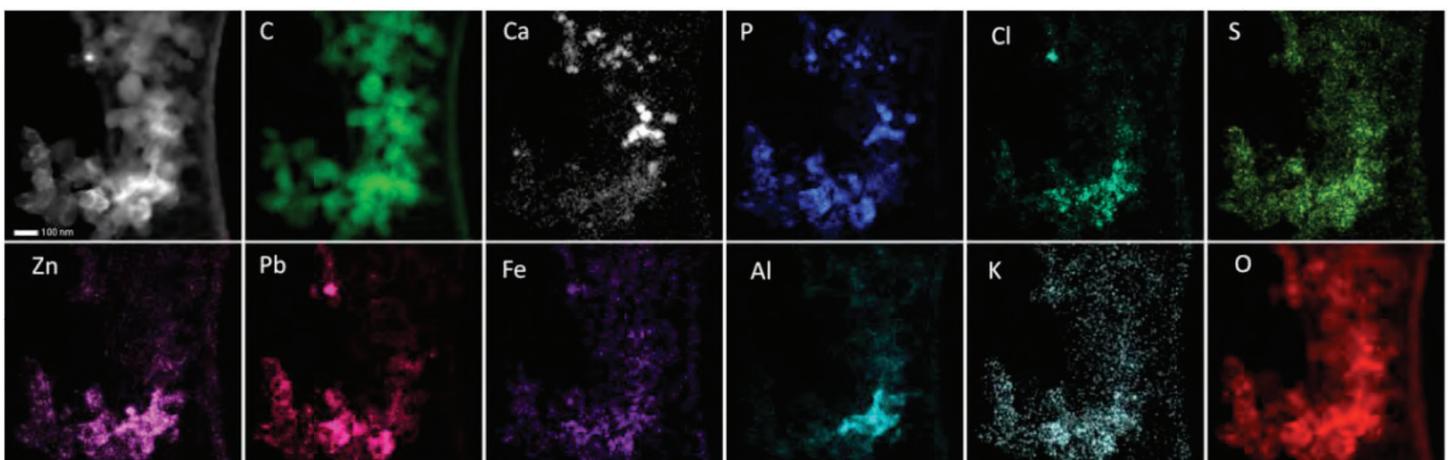
Damit benennt Onder die drei zentralen Fragestellungen, die im Rahmen des Projekts jeweils von einem Forscherteam bearbeitet wurden: Den neuen Brennverfahren widmete sich das ETH-Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV/Prof. Konstantinos Boulouchos), um die Regelungstechnik das ETH-Institut für dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC/Prof. Christopher Onder), während die Empa-Abteilung Fahrzeugantriebssysteme (Christian Bach) Fragen der Motorkonstruktion bearbeitete. Die drei Partner bearbeiteten in den drei Teilprojekten je eigene Fragestellungen, stellten dabei aber immer wieder wichtige Querbezüge her. «Diese lockere Zusammenarbeit war sehr hilfreich und hat uns weitergebracht», sagt Christopher Onder.

OME-Motor ermöglicht kompakten Kat

Die LAV-Forscher befassten sich in ihrem Teilprojekt mit der Verbrennung von OME in einer isolierten Brennkammer sowie einem speziellen Einzylinder-Versuchsdieselmotor. Für ihre Studie nutzten sie als Treibstoff reines sowie auch mit Dieselkraftstoff gemischtes OME. Ein zentrales Ergebnis: Bei der Verbrennung von reinem OME entsteht praktisch kein



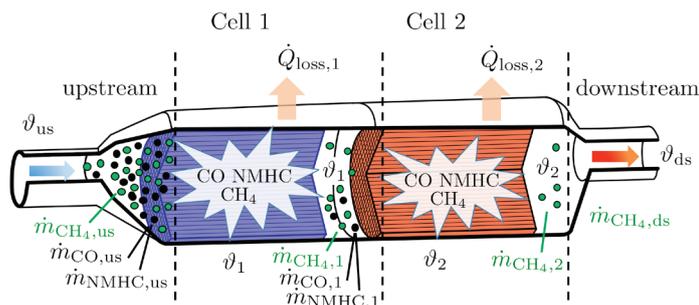
Bei der Verbrennung von OME verhindert der im Treibstoff enthaltene Sauerstoff die Russbildung. Die Aufnahme – 1.4 Millisekunden (ms) nach dem Start der Injektion (start of injection/SOI) – zeigt die Russkontur eines Treibstoffstrahls (Injektion von unten links nach rechts oben) als Differenz zwischen zwei Versuchsanordnungen: Beim ersten Versuch (Aussenkontur in rot) wurde dem Diesel 5% OME beigemischt, im zweiten Versuch (Aussenkontur in blau) 50%. Im zweiten Fall ist weniger Russ (dunkle Fläche) sichtbar. Führt man den Versuch mit reinem OME durch, ist gar kein Russ mehr sichtbar. Der Russ wurde mithilfe von 2-Farben-Pyrometrie sichtbar gemacht. Grafik: Iannuzzi, S.E., Barro, C., Boulouchos, K., and Burger, J., «Combustion behavior and soot formation/oxidation of oxygenated fuels in a cylindrical constant volume chamber.» Fuel, 2016. 167(Supplement C): p. 49-59, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.060>.)



Aufnahme mittels Transmissionselektronenmikroskopie zeigt das Vorkommen von zwölf chemischen Elementen auf einem Russpartikel im Abgas des 1-Zylinder Forschungsmotors nach der Verbrennung von reinem OME. Interessanterweise stammen die nachgewiesenen Elemente nicht aus dem Treibstoff, sondern aus dem Schmieröl. Das konnten die Forscher des ETH-Labors für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) anhand der Zusammensetzung der Partikel zeigen. Grafik: Barro, C., Parravicini, M., Boulouchos, K., and Liati, A., «Neat polyoxymethylene dimethyl ether in a diesel engine; part 2: Exhaust emission analysis.» Fuel, 2018. 234: p. 1414-1421, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.108>.)

Russ. Der grosse Vorteil: Die Abgasnachbehandlung kann bei der Nutzung von OME gegenüber Diesel stark vereinfacht werden – auf einen Feinstaubpartikelfilter kann bei gegenwärtiger Gesetzgebung ebenso verzichtet werden wie auf ein SCR-System zur Reduktion der Stickoxide. Diese können dann, zusammen mit CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen, in einem kompakten 3-Wege-Katalysator entfernt werden.

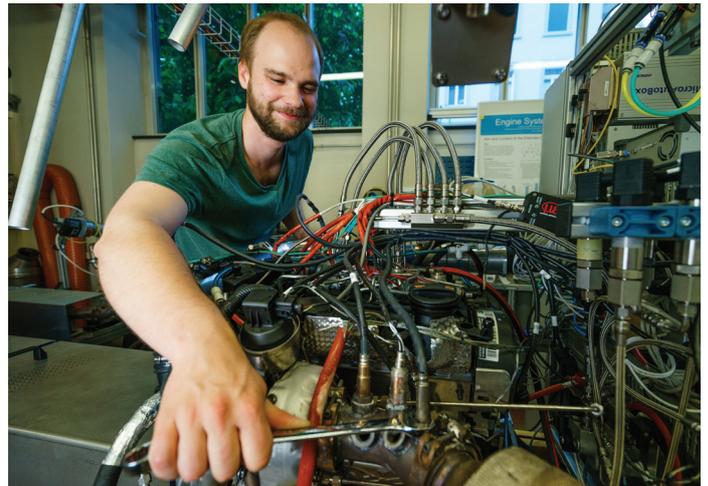
Dieser Vorzug hat die Schweizer Baumaschinenherstellerin Liebherr (Bulle/FR) überzeugt, in einem Nachfolgeprojekt mit den ETH-Forschern zusammenzuspannen: In dem Projekt, das wie zuvor schon NextICE vom BFE unterstützt wird, soll auf der Basis von OME ein Motor mit einem kompakten Katalysator für Baumaschinen entwickelt werden. Diese Baumaschinen könnten mit einem CO₂-neutralen Treibstoff betrieben werden, der allerdings – das die Kehrseite – einen tieferen Heizwert hat als Diesel und auch mehr kostet.



In der Motorenforschung der ETH Zürich spielen mathematische Modelle eine wichtige Rolle. Das abgebildete Schema eines modifizierten Dieselmotors (Oxidationskatalysators) dient dazu, ein mathematisches Modell der chemischen Prozesse zu erstellen, die in einem Katalysator ablaufen. Die ETH-Forscher interessieren sich insbesondere für die schädlichen Abgase Kohlenstoffmonoxid (CO) sowie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (dazu gehören Methan/CH₄ sowie Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe/NMHC). Die Wissenschaftler können mit den mathematischen Modellen unter anderem jene Temperatur bestimmen, bei der die schädlichen Abgase im Katalysator am wirkungsvollsten verbrannt werden. Illustration: IDSC

Methan-Motor optimal betreiben

Die Wissenschaftler um Prof. Onder näherten sich dem neuen Verbrennungsmotor von der Seite der Regelungstechnik. Sie wollten dabei unter anderem wissen, welches die optimale Betriebsstrategie für einen mit Biotreibstoffen oder nachhaltigen synthetischen Treibstoffen betriebenen Motor ist. Der Betrieb eines PKW ist sehr dynamisch und der Motor muss daher schnelle Drehzahl- und Drehmomentwechsel vollziehen können. «Ein Motor arbeitet bei verschiedenen Betriebspunkten und muss die Übergänge zwischen ihnen

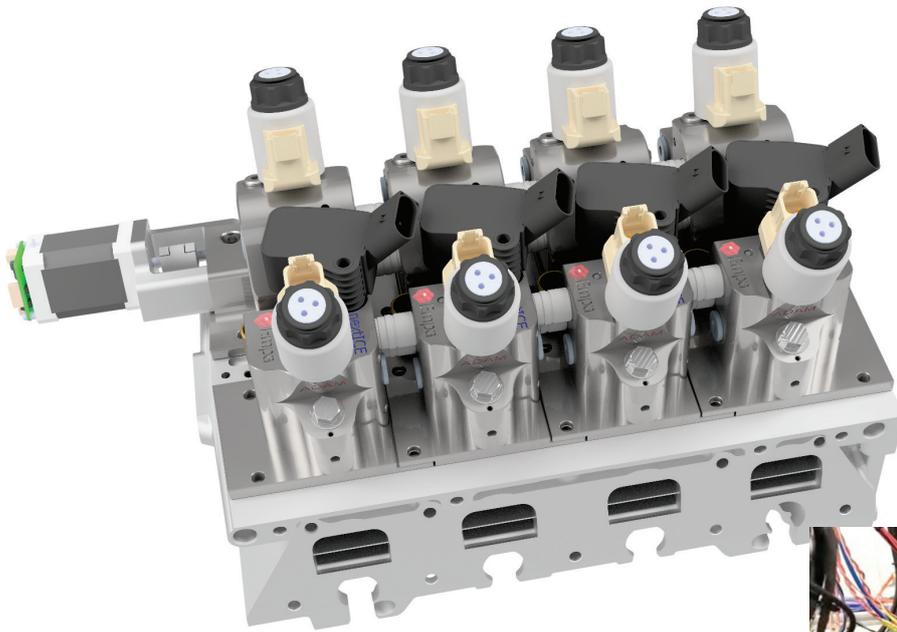


Richard Hutter hat im Rahmen seiner Doktorarbeit an der ETH Zürich Experimente an einem modifizierten Dieselmotor (Zündstrahl-Motor) durchgeführt: In dem Motor wird der zündwillige Diesel eingesetzt, um das zündunwillige Methan zu zünden. Foto: IDSC

gut meistern; das ist eine grosse Herausforderung gerade für Benzin-ähnliche und damit zündunwillige Treibstoffe, zu denen Methan, Ethanol und Methanol gehören», sagt Richard Hutter, der hauptverantwortliche Forscher in der Arbeitsgruppe von Prof. Onder. Hutter hat im Rahmen des vorliegenden Projekts seine Doktorarbeit verfasst.

Richard Hutter konzentrierte sich in seiner Untersuchung auf Methan. Methan ist der Hauptbestandteil von Erdgas, lässt sich aber auch aus biogenen Quellen – zum Beispiel Biogas – oder synthetisch unter Einsatz von erneuerbarem Strom gewinnen. Methan wird heute schon in Autos als Treibstoff verwendet, die von einem auf Gasbetrieb umgerüsteten Benzinmotor angetrieben werden. Richard Hutter ging in seiner Untersuchung nun einen Schritt weiter: Er setzte Methan in einem modifizierten Dieselmotor ein: In dem sogenannten Zündstrahl-Motor wird der (zündwillige) Diesel genutzt, um das (zündunwillige) Methan zu zünden. Der ETH-Forscher konnte in seiner Studie einen entscheidenden Vorteil dieses Konzepts aufzeigen: «Wir konnten mit dem Zündstrahl-Motor die Effizienz des Methan-betriebenen Motors um 5 Prozentpunkte auf 42% steigern, das heisst, wir haben mit dem Benzin-ähnlichen Treibstoff Methan die Effizienz eines Dieselmotors erreicht», fasst Hutter ein Hauptergebnis seiner Studie zusammen.

Ein Augenmerk der Forscher lag auf einer effizienten und kostengünstigen Abgasnachbehandlung, die bei dem hocheffizienten Methan-Motor hohe Anforderungen stellt. Hut-

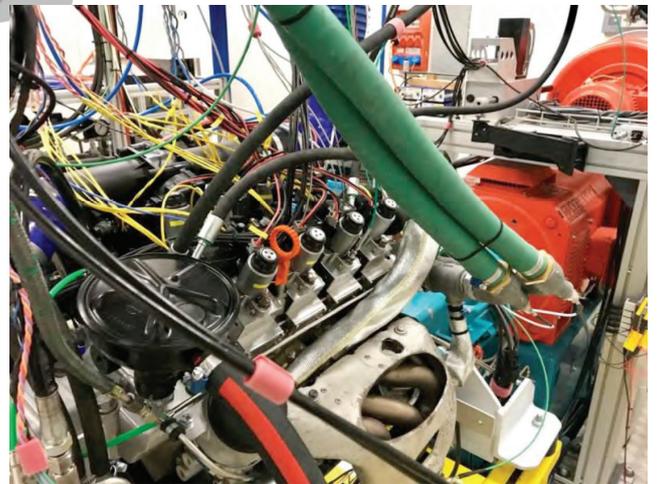


Links: CAD-Design des vollvariablen Ventiltriebs.
 Unten: 1.4 Liter-Vierzylinder-Gasmotor mit dem vollvariablen Ventiltrieb am Motorenprüfstand der Empa in Dübendorf.
 Illustrationen: Empa

ters Studie beschreibt mit mathematischen Modellen die Bedingungen, bei denen ein Zündstrahl-Motor innerhalb der gesetzlichen Emissionswerte betrieben werden kann. Das gelingt, wenn die Abgastemperatur so gewählt wird, dass das unverbrannte Methan im Abgas möglichst vollständig oxidiert und so der Ausstoss dieses besonders problematischen Klimagases minimiert werden kann. Die Ergebnisse fließen zur Zeit in ein europäisches Nachfolgeprojekt unter Einbezug des VW-Konzerns ein.

Abschied von der Nockenwelle

Während die bisher dargestellten NextICE-Teilstudien beim Verbrennungsprozess bzw. der Betriebsregelung ansetzten, gingen Empa-Forscher im dritten Teilprojekt daran, den Ottomotor – oder genauer gesagt: eine zentrale Komponente von ihm – neu zu erfinden. Es handelt sich dabei um die Nockenwelle. Diese betätigt bei Viertaktern (und bei einigen Zweitaktern) die Ventile, welche den Eintritt der Luft in die Verbrennungszylinder bzw. später den Austritt der Abgase steuern. Die Aufgabe der Nockenwelle übernimmt in der Empa-Entwicklung ein elektrohydraulischer Ventiltrieb, mit dem sich die klassischerweise verwendete und mit Verlusten behaftete Drosselklappe erübrigt. Der Vorzug des neuen Ventiltriebs: Er ermöglicht eine flexible Steuerung der Ein- und Auslassventile. Das bereitet den Boden für neuartige Motorenkonzepte – zum Beispiel einen Motor, der beim Beschleunigen als Zweitakter und während der normalen Fahrt als Viertakter funktioniert. Weil PkW-Motoren einen wesentli-



chen Teil der Zeit im tiefen Teillastbereich laufen, trägt der neue Ventiltrieb zu einem besonders effizienten und damit treibstoffsparenden Betrieb bei. Er begünstigt darüber hinaus den Einsatz neuartiger, beispielsweise erneuerbarer Treibstoffe. Als Hydraulikfluid nutzt der Ventiltrieb nicht Öl, sondern ein Wasser-Glykol-Gemisch. So kann die Additivierung des Motorenöls reduziert werden, was der Langlebigkeit des Katalysators zugute kommt und Kosten spart.

Die Empa-Forscher haben in einem Funktionsmuster die Vorzüge des voll flexiblen Ventiltriebs demonstriert, entsprechende Patente wurden angemeldet. Zur Zeit läuft an der Empa ein Nachfolge-Projekt (FlexWork), bei dem der Ventiltrieb in einem mit Methan betriebenen Ottomotor zum Einsatz kommt. «Dank des neuen Projekts werden wir den Effizienzvorteil des flexiblen Ventiltriebs quantifizieren können», sagt Empa-Forscher Dr. Patrik Soltic. Der Wissenschaftler veranschlagt die Reduktion des Treibstoffverbrauchs im

Vergleich zu einem klassischen Nockenwellen-Ventiltrieb auf mindestens 10%. Gegenwärtig wird ein Industriepartner gesucht, der sich auf die Herausforderung einlässt, den neuen Ventiltrieb für den Bau eines innovativen Ottomotors ohne die altbewährte Nockenwelle zu nutzen. Gelingt dies, lässt sich vielleicht eine schweizerische Erfolgsgeschichte wiederholen: In den 1980er Jahren war der damalige ETH-Forscher Wolfgang Schneider massgeblich an der Entwicklung der Common-Rail-Einspritzung beteiligt, die unterdessen in Dieselmotoren weit verbreitet ist und einen flexibleren und sparsameren Betrieb ermöglicht. Derselbe Wolfgang Schneider hat mit seinem Ingenieurbüro auch an der Entwicklung des neuen Ventiltriebs mitgewirkt.

- Den **Schlussbericht** zum Projekt «NextICE – Next Generation of Alternative Fuel Converters in the Transportation Sector» finden Sie unter:
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=34728>
- **Auskünfte** zu dem Projekt erteilt Dr. Carina Alles (carina.alles[at]bfe.admin.ch), Bereichsleiterin des BFE-Forschungsprogramms Verbrennungsbasierte Energiesysteme.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Mobilität finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-mobilitaet.