

BRENNSTOFF IST NICHT GLEICH BRENNSTOFF – VON DER FORSCHUNG ZUR INDUSTRIELLEN ANWENDUNG

Die Energieumwandlung in Verbrennungsprozessen ist aussergewöhnlich gut erforscht – und hält doch immer wieder neue, faszinierende Fragestellungen bereit. Motorenforscher richten aktuell einen Fokus auf die Brennstoffvielfalt. Grund ist die wachsende Bedeutung von Gasen aus erneuerbaren Quellen. Hinzu kommen Fragen der – stark schwankenden – Brennstoffqualität.

Benedikt Vogel, im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE)

Erdgas ist kein erneuerbarer Energieträger, aber Erdgas verbrennt mit weniger schädlichen Rückständen als Kohle oder Schweröl. Erdgas steht dank dieser Eigenschaften als Brennstoff für Verbrennungsmotoren hoch im Kurs. Doch Erdgas ist nicht gleich Erdgas. Es kommt vielmehr in unterschiedlichen Qualitäten vor. So besteht Erdgas neben dem Hauptbestandteil Methan noch aus anderen Komponenten. In Schweizer Erdgas russischen Ursprungs sind rund 6% Ethan, Propan und Butan enthalten: Bei Erdgas aus anderen Förderstätten kann dieser Anteil auf 20 und mehr Prozent ansteigen. Neben der Herkunft spielt auch der Herstellungsprozess für die Zusammensetzung

RÉSUMÉ

TOUS LES COMBUSTIBLES NE SE RESSEMBLENT PAS

Les différentes qualités de gaz proposées sur les marchés mondiaux intéressent les consommateurs finals mais aussi la science. C'était le cas lors de la journée d'étude consacrée à la recherche sur la combustion en Suisse, organisée en septembre 2015 à Zurich par l'Office fédéral de l'énergie, l'EPF de Zurich et l'Institut Paul Scherrer. Cette journée sur la combustion a permis de créer une passerelle entre la recherche universitaire et les applications industrielles, notamment de manière plus concrète par le biais d'un projet portant sur la combustion étagée dans des turbines à gaz, mené conjointement par la Haute école spécialisée de la Suisse nord-occidentale (FHNW) et le groupe industriel Alstom. L'expérimentation a montré que la charge partielle génère moins d'émissions que le fonctionnement à pleine charge de turbines à gaz traditionnelles sans technique de brûleur innovante. Les résultats de cette recherche revêtent une importance pratique considérable pour l'industrie, si elle souhaite doter ses turbines à gaz d'une capacité multi-fuel. Certains concepteurs de moteurs de bateau comme Winterthur Gas & Diesel Ltd., en revanche, travaillent sur le système dual fuel, qui intéresse aussi la recherche – qui a déjà une longue tradition en matière de moteurs à combustion, mais livre des résultats de plus en plus précis. En effet, il est aujourd'hui possible de décrire avec une précision inégalée les processus à l'œuvre dans une chambre de combustion grâce aux outils de simulation tels que la DNS (*Direct Numerical Simulation*). Les résultats de la recherche fondamentale constituent une contribution essentielle pour les entreprises industrielles suisses. C'est ce que démontrent p. ex. les capteurs de qualité de gaz que la société MEMS AG (Birmenstorf) a développés en collaboration avec l'Empa.

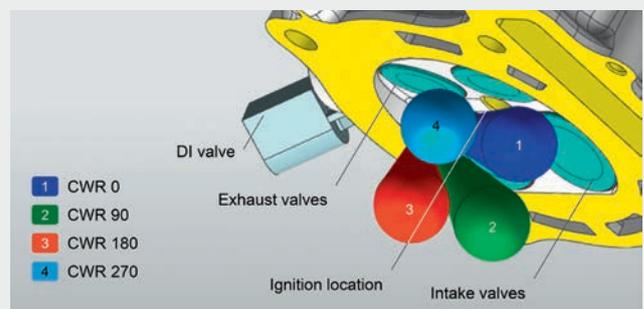


Fig. 1a Die Empa hat erforscht, wie sich das Brennverfahren bei Gasmotoren modifizieren lässt, indem man den Grossteil des Gases im Saugrohr vormischt und einen kleinen Teil direkt in den Brennraum einbläst. Betrachtet wurden Brennstoffkombinationen bestehend aus Methan (Erdgas/Biogaz) sowie Wasserstoff. Das Bild zeigt die vier Richtungen der Direkteinblasung, welche untersucht wurden. Die Einblasrichtung 1 (CWR0) richtet den Strahl ziemlich direkt auf die Zündkerze und mag darum die lokalen Bedingungen zum Zeitpunkt der Zündung am direktesten zu beeinflussen (Illustration: Empa)

Selon l'Empa, il est possible de modifier le processus de combustion des moteurs à gaz en mélangeant préalablement la plus grande partie du gaz dans le tube d'aspiration et en injectant une petite partie directement dans la chambre de combustion. On a observé des combinaisons de combustibles composées de méthane (gaz naturel/biogaz) et d'hydrogène. L'illustration présente les 4 directions de l'injection directe. Avec la direction d'injection 1 (CWR0), le jet est dirigé assez directement sur la bougie d'allumage et peut influencer le plus directement les conditions locales au moment de l'allumage

eines Gases eine grosse Rolle. Das zeigen die biogenen Gase, die durch die Vergärung von Biomasse (Biogas) oder aus Holz (Holzgas) gewonnen werden, aber auch Gase, denen Wasserstoff oder Methan beigemischt wird, die zuvor unter Verwendung von erneuerbarem Strom gewonnen wurden.

BRÜCKENSCHLAG ZUR INDUSTRIE

Die unterschiedlichen Gasqualitäten, die auf den weltweiten Märkten angeboten werden, beschäftigen nicht nur die direk-

Auskünfte zur Schweizer Verbrennungsforschung erteilt Stephan Renz, Leiter des BFE-Forschungsprogramms Verbrennung: renz.btr@swissonline.ch

ten Verbraucher, sondern auch die Wissenschaft. So war es auch an der Tagung zur Schweizer Verbrennungsforschung, die das Bundesamt für Energie, die ETH

Zürich und das Paul Scherrer Institut im September 2015 in Zürich durchführten. Die Verbrennungstagung macht jeweils den Brückenschlag von der akademi-

schen Forschung zu den industriellen Anwendungen (Fig. 1a und b). Das wurde an der Zürcher Tagung zum Beispiel anschaulich beim Thema Gasturbinen. Diplomchemieingenieur *Dieter Winkler* berichtete von einem Projekt zur gestuften Verbrennung in Gasturbinen, das die Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) in Zusammenarbeit mit dem Industriekonzern *Alstom* durchgeführt hat. Die Versuchsanlage wurde konstruiert für den Betrieb mit Erdgas, das zur Veränderung der Reaktivität mit Propan, nicht reaktivem CO₂ oder hochreaktivem Wasserstoff versetzt wurde (jeweils mit einem Anteil von bis zu 20%). Die Versuchsreihen mit der gestuften Verbrennung bestätigten die Vermutung, dass die neuartige Brennertechnik mit solch ungewöhnlichen Brennstoffen gut zu recht kommt und auch im Teillastbetrieb vergleichsweise «sauber» arbeitet. «Wir konnten experimentell zeigen, dass bei Teillast weniger Emissionen resultieren als bei Vollastbetrieb von herkömmlichen Gasturbinen ohne neuartige Brennertechnik», fasst Winkler ein zentrales Ergebnis zusammen (Fig. 2 und 3). Diese Forschungsergebnisse sind von erheblicher praktischer Bedeutung. Das machte das Referat von *Khawar Syed*, Entwicklungsingenieur bei *Alstom Schweiz*, deutlich. «Gestufte Verbrennung ist der aktuelle Trend in der Industrie», sagte Syed und illustrierte die Feststellung mit den *Alstom*-Gasturbinen GT24 und GT26. Diese Turbinen verfügen jeweils über zwei in Serie angeordnete Brennkammern. Anders als bei der Versuchsanlage der FHNW erfolgt die Luftbeimischung

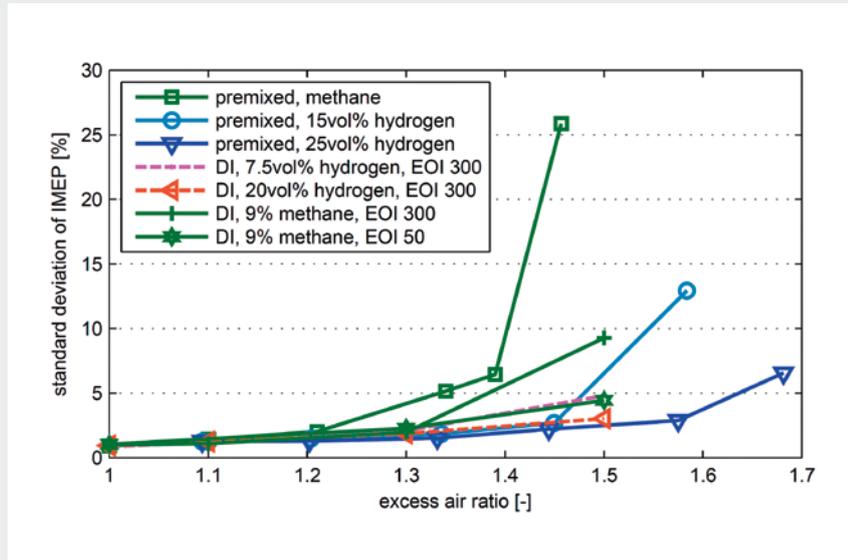


Fig. 1b Empa-Forschung zu den Brennverfahren bei Gasmotoren: Diese Bild zeigt die zyklischen Variationen der Verbrennung für die verschiedenen untersuchten Fälle gegenüber dem Luftüberschuss. Grosse zyklische Variationen führen zu unrundem Motorlauf und zu hohen Emissionen. Man erkennt, dass bei den vorgemischten («premixed») Fällen (also ohne Direkteinblasung; abgekürzt: DI) Wasserstoff-angereichertes Methan zu deutlich stabilerem Magerlauf führt (gemessen an der Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks/IMEP). Die Direkteinblasung von Wasserstoff bringt keine wirklichen Vorteile im untersuchten Versuchsträger. Interessant ist allerdings die Direkteinblasung einer kleinen Menge Methan in Richtung Zündkerze, dies führt zu einer sehr starken Ausweitung der Magerlaufgrenze. Es konnte also experimentell nachgewiesen werden, dass durch die Direkteinblasung einer kleinen Menge Methan direkt in Richtung Zündkerze gute Bedingungen für eine robuste Verbrennung geschaffen werden können. Vorteile wird man erst nach einer gezielten Entwicklung des Motors auf dieses Gemischbildungsverfahren quantifizieren können (Grafik: Empa)

Recherche de l'Empa sur les processus de combustion des moteurs à gaz: cette illustration présente les variations cycliques de la combustion pour les différents cas étudiés face à l'excédent d'air

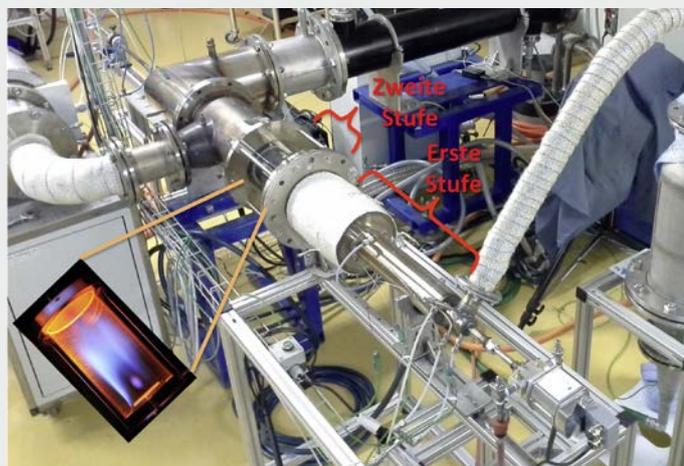


Fig. 2 Versuchsanlage für gestufte Verbrennung an der Fachhochschule Nordwestschweiz in Windisch (Bild: FHNW)
Installation expérimentale de combustion étagée de la Haute école spécialisée de la Suisse nord-occidentale à Windisch

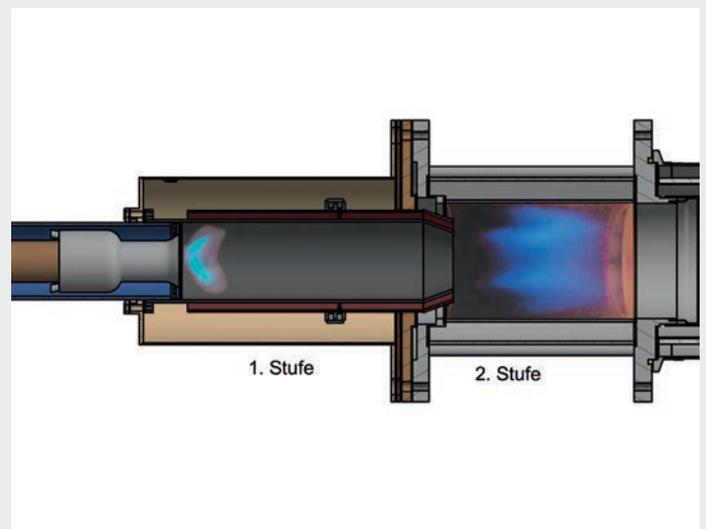


Fig. 3 Schematische Darstellung der gestuften Verbrennung (Illustration: FHNW)
Représentation schématique de la combustion étagée



Fig. 4 Dual-Fuel-2-Takt-Versuchsmotor bei Winterthur Gas & Diesel in Winterthur (Bild: WinG&D)
 Prototype de moteur dual fuel à 2 temps de la société Winterthur Gas & Diesel à Winterthur

nicht separat für jede der beiden Brennkammern, sondern in der zweiten Brennkammer wird dem noch sauerstoffhaltigen Abgas der ersten Brennkammer – das die Hochdruckturbine angetrieben hat – nochmals Brennstoff beigemischt, wodurch das Gemisch wiederum zündet und über die Niederdruckturbine expandiert. Moderne Gasturbinen will *Alstom* so auslegen, dass sie mit einem breiten Spektrum von Brennstoffen/Reaktivitäten zurecht kommen (*fuel flex*), aber auch so betrieben werden können, dass Gaskraftwerke die Produktionsschwankungen etwa von Wind- und Solarstrom ausgleichen können (*load flex*). Die Entwickler arbeiten auf sehr tiefe Stickoxid (NO_x)-Emissionen hin, gleichzeitig aber auch auf eine weitere Erhöhung des Wirkungsgrads von kombinierten Gas- und Dampfturbinen über die heute erreichbaren 61% hinaus, wie Syed sagt: «Wir und unsere Wettbewerber arbeiten auf einen Wirkungsgrad von 65 und mehr Prozent hin.»

EIN MOTOR, ZWEI TREIBSTOFFE

Während die Industrie ihre Gasturbinen auf «Multi Fuel-Fähigkeit» trimmt, arbeiten Entwickler von Schiffsmotoren an der Markteinführung und Optimierung von sogenannten «Dual Fuel»-Brennverfahren. Heutige 2-Takt-Schiffsmotoren werden in der Regel mit Schweröl oder Marinediesel (MDO) betrieben. «Dual Fuel»-Motoren, wie sie in der Schifffahrt zunehmend zum Einsatz gelangen, werden mit Gas betrieben, das durch eine Kleinmenge Dieselmotorenkraftstoff gezündet wird. «Zweitakt-Dual-Fuel-Motoren von *Winterthur Gas & Diesel* zeichnen sich aufgrund der ottomotorischen Prozessführung im Gasbetrieb dadurch aus, dass sie ohne innermotorische Massnahmen oder Abgasnachbehandlung die Erfüllung der künftigen Emissionsgrenzwerte sowohl hinsichtlich Stickoxid-Ausstoss, als auch in Bezug auf Schwefeldioxid- und Partikelemissionen ermöglichen», sagt *Sebastian Hensel* von der *Winterthur Gas & Diesel Ltd.* Hensels Unternehmen ist ein Forschungs- und Entwicklungszentrum für Schiffsmotoren, das das Schiffsbauunternehmen *CSSC* (China) und der Motorenhersteller *Wärtsilä* (Finnland) gemeinsam in Winterthur betreiben. Dafür nutzt die Firma mit ihren 350 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unter anderem eine optisch zugängliche Brennkammer, in der die physikalisch-chemi-

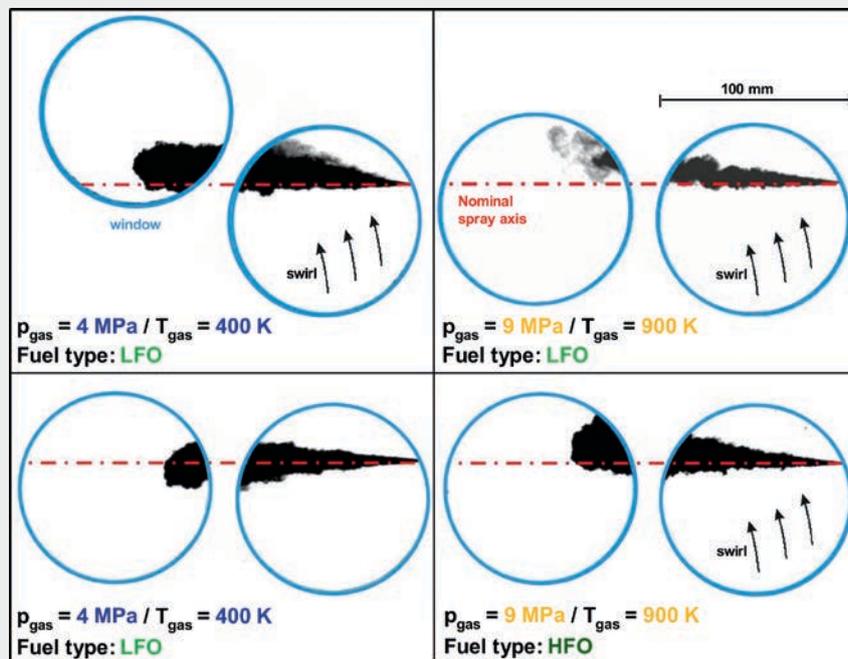


Fig. 5 Vergleich der Spraymorphologie ca. 1,6 ms nach Einspritzbeginn hinsichtlich Verdampfung, Drall und Brennstoffqualität (bei konstanter Gasdichte $\rho_{\text{gas}} = 33 \text{ kg/m}^3$). LFO = Light Fuel Oil (Heizöl extra leicht), HFO = Heavy Fuel Oil (Schweröl) (Illustration: WinG&D)
 Comparaison de la morphologie du spray env. 1,6 ms après le début de l'injection, du point de vue de l'évaporation, du moment cinétique et de la qualité des combustibles (avec densité de gaz constante $\rho_{\text{gas}} = 33 \text{ kg/m}^3$). LFO = Light Fuel Oil (huile de chauffage extra-légère), HFO = Heavy Fuel Oil (pétrole lourd)

schen Abläufe der Dieselerverbrennung in Zweitaktmotoren exakt nachgebildet werden können (Fig. 4). Beat von Rotz hat an diesem einmaligen Prüfstand im Rahmen seiner Doktorarbeit das Einspritz- und das Zündverhalten verschiedener Brennstoffe untersucht, vor allem die Spraymorphologie des Einspritzstrahls von zahlreichen Parametern (z. B. Druck und Temperatur in der Brennkammer, Einspritzdruck, Drall, Düsenlochdurchmesser, Brennstoffqualität). Überdies erforschte er die mikroskopischen Sprayparameter (Tröpfchengrösse und -geschwindigkeit) sowie die Charakteristiken der Zündung. Daraus ging ein umfassendes Set von Referenzdaten hervor. Diese enthalten grundlegende Erkenntnisse zu den speziellen Charakteristiken der Einspritz- und der Zündprozesse und dienen den Ingenieuren nun dazu, zuverlässige Modelle für die Entwicklung neuer Motoren zu erstellen (Fig. 5).

SIMULATIONEN MIT NIE DAGEWESENER GENAUIGKEIT

Die «Dual Fuel»-Thematik interessiert nicht nur die Anwender, sondern auch die Wissenschaftler am Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) der ETH Zürich. Dies führt die Forschung von Doktorand *Daniele Farrace* vor Augen, der neuen Konzepten für «Dual Fuel»-Motoren nachgeht. Obwohl die Forschung im Bereich Verbrennungsmotoren eine lange Tradition hat, wartet diese Disziplin mit immer noch exakteren Ergebnissen auf. So lassen sich heute die Vorgänge in einer Brennkammer dank Simulationswerkzeugen wie DNS (*Direct Numerical Simulation*) mit einer niemals dagewesenen Genauigkeit beschreiben (Fig. 6). ETH-Forscher *Martin Schmitt* wendet DNS erstmals auf motoren-ähnliche Geometrien an. Dabei unterteilt er das Volumen eines Verbrennungszyinders in 135 Mio. winzige Teilvolumina. Für jedes einzelne dieser Elemente enthält seine Simulation Daten zu Geschwindigkeit, Druck, Temperatur und chemischer Zusammensetzung. Kein Wunder, sind solche Simulationen nur mit Grossrechnern zu bewältigen. Schmitt braucht für seine Arbeit die Rechner-

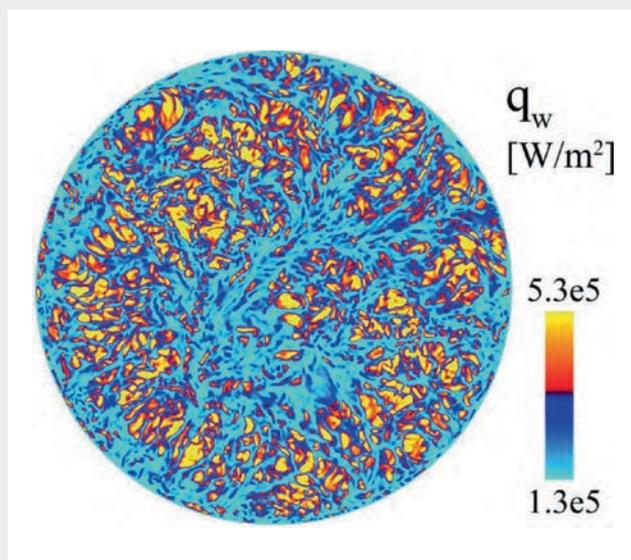


Fig. 6 ETH-Forscher können dank dem Simulationswerkzeug DNS die Hitzeverteilung im Zylinder eines Verbrennungsmotors mit einer bisher nicht bekannten Genauigkeit darstellen (Bild: ETHZ)
Grâce à l'outil de simulation DNS, les chercheurs de l'EPF peuvent représenter la répartition de la chaleur dans le cylindre d'un moteur à combustion avec une précision jusqu'ici inégalée

leistung von 2500 Personal-Computern. «Mit meiner Forschung kann ich im Erfolgsfall einen Beitrag leisten, um zukunftsweisende Motortechnologien wie HCCI zu kontrollieren», sagt Schmitt. HCCI, die homogene Kompressionszündung, zielt auf eine möglichst gleichzeitige Verbrennung eines homogenen Brennstoffgemischs ab, um damit die Schadstoffemissionen zu minimieren. Dieses Forschungsprojekt zeigt zugleich, wie anspruchsvoll Verbrennungsforschung heute ist. «In den Resultaten, die unsere Forscher heute vorweisen können, steckten letztlich über 20 Jahre Arbeit an unserem Institut», sagt Prof. *Konstantinos Boulouchos*, der Leiter des LAV an der ETH Zürich.

INDUSTRIE NUR MIT FORSCHUNG INNOVATIV

Die Resultate aus der Grundlagenforschung bilden einen wichtigen Input für Schweizer Industrieunternehmen. Anschaulich wird das beispielsweise in den Gasqualitätssensoren, die die MEMS AG (Birmenstorf) gemeinsam mit der Empa entwickelt (Fig. 7). Anschaulich wird das auch in der Person von *Guoqing*

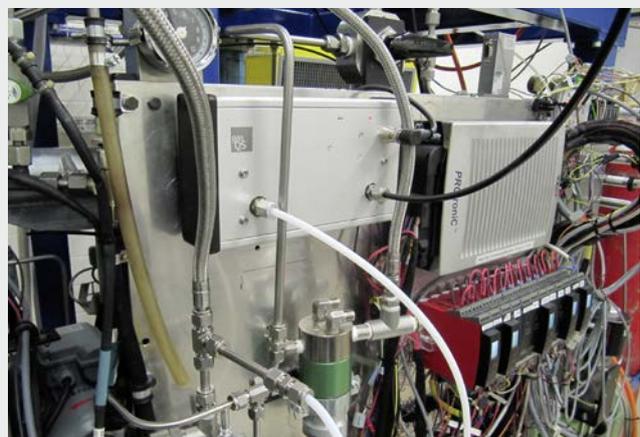


Fig. 7 Die MEMS AG (Birmenstorf) hat gemeinsam mit dem 'Automotive Powertrain Technologies Laboratory' der Empa (Dübendorf) den Einfluss der Gasqualität auf Verbrennungsprozesse untersucht. Auf dem Bild ist der MEMS-gasQS-Sensor auf dem Prüfstand der Empa zu sehen (Bild: Empa)

La société MEMS AG (Birmenstorf) a analysé, en collaboration avec le 'Automotive Powertrain Technologies Laboratory' de l'Empa (Dübendorf) l'influence de la qualité du gaz sur les processus de combustion. Photo: capteur MEMS gazQS sur le banc d'essai de l'Empa

Xu, der als Doktorand der ETH für die Baumaschinen-Herstellerin *Liebherr Machines Bulle SA* forscht. Seine wissenschaftliche Arbeit dient dazu, Vorhersagemodelle für die Gasmotoren-Linie von Liebherr zu entwickeln. Den Bogen zur industriellen Anwendung schlug an der Verbrennungstagung in Zürich auch *German Weisser* von der *ABB Turbo Systems Ltd.* (Baden). Weisser betonte, Forschung sei für seine Firma essentiell. Nur auf diesem Weg könne *ABB Turbo Systems* Produkte wie z. B. Turbolader und Lösungen entwickeln, die es den Kunden (Hersteller von Diesel- und Gasmotoren, Endkunden) ermöglichen, einen Mehrwert für ihre Motoren und Anlagen in Form erhöhter Leistungsfähigkeit und Effizienz, tieferer Emissionen sowie gesteigerter Flexibilität im Betrieb sicherzustellen (Fig. 8). Die 200 Wissenschaftler und Ingenieure der F&E-Abteilung müssen daher über geeignete Simulationswerkzeuge zur Beschreibung motorischer Kernprozesse (Verbrennung, Schadstoffbildung), aber auch zur



Fig. 8 Zweistufiges Aufladesystem Power2 von ABB für Diesel- und Gasmotoren mit höchster Leistungsfähigkeit (Foto: ABB Turbo Systems AG)
 Système de suralimentation à deux étages Power 2 d'ABB pour des moteurs Diesel et à gaz montrant une puissance élevée

Bewertung zuverlässigkeitsrelevanter Parameter verfügen. Die F & E-Aktivitäten müssen, so Weisser, immer wieder darauf hin

WEITERGEHENDE INFORMATIONEN

Weitere Fachbeiträge über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Verbrennung finden Sie unter www.bfe.admin.ch/CT/verbrennung

ausgerichtet werden, die richtigen Antworten auf die aktuellen Trends in der Motorenindustrie zu geben. Diese Trends fasst der ABB-Verbrennungsexperte so zusammen: rückläufige Qualität der Flüssigbrennstoffe, Vormarsch gasförmiger Brennstoffe, weitere Steigerung der Effizienz, wachsende regulatorische und betriebliche Anforderungen. Um diese Ziele zu erreichen, müsse Motorenforschung immer den Blick aufs Ganze richten, betont Weisser, denn: «Was am Ende zählt ist die Performance des Gesamtsystems.»