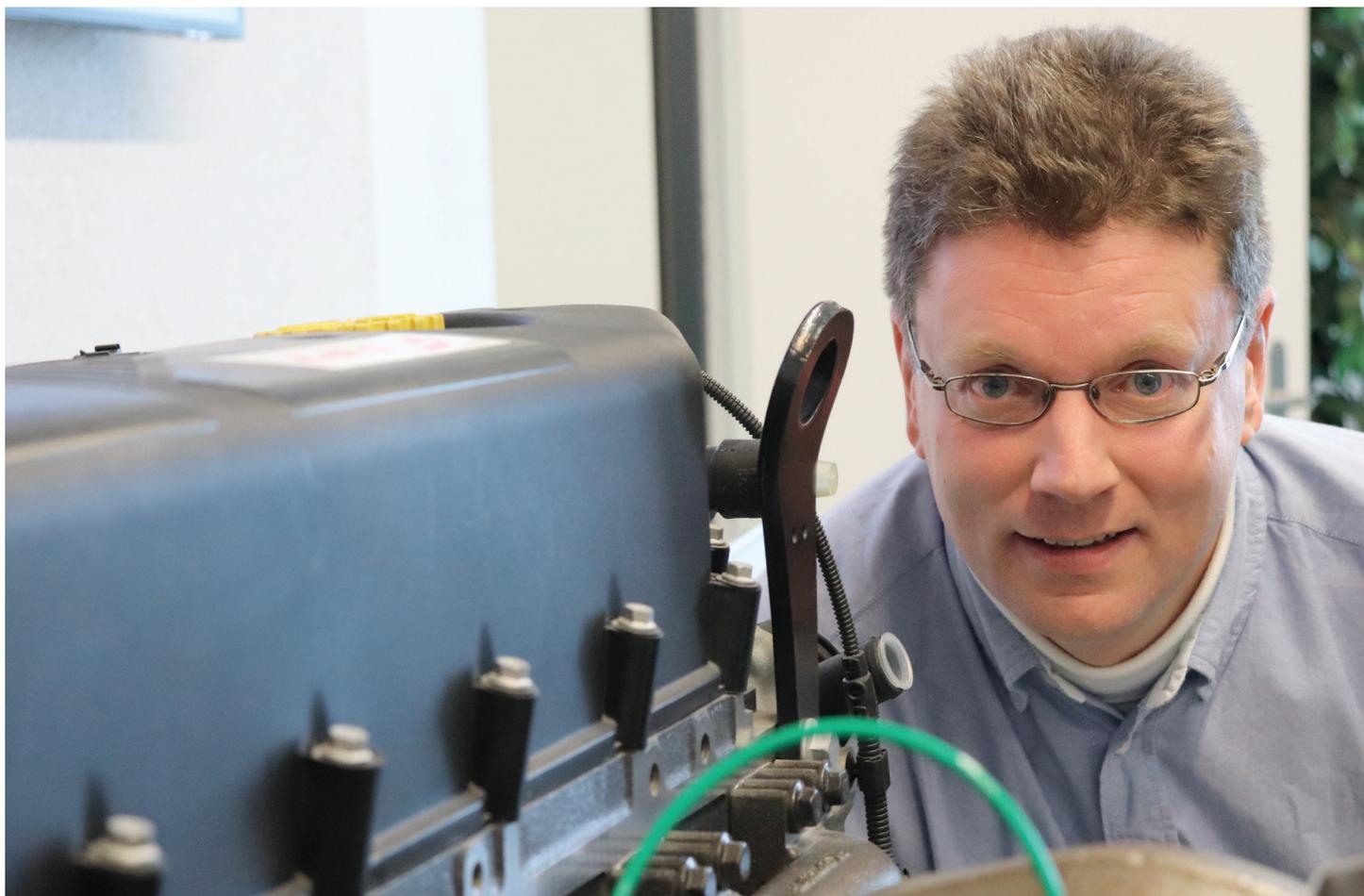


EFFIZIENTE UND SAUBERE DIESELMOTOREN

Dieselmotoren leisten in Personenwagen und Nutzfahrzeugen seit Jahrzehnten gute Dienste. Aktuell dreht sich um ihre Umweltbelastung jedoch eine heftige Debatte. Die FPT Motorenforschung AG in Arbon (TG) will den Dieselmotor weiter verbessern, da für eine Vielzahl von Nutzfahrzeugen und Maschinen bislang gleichwertige Alternativen fehlen. In einem vom Bundesamt für Energie unterstützten Forschungsprojekt haben die FPT-Ingenieure Wege aufgezeigt, wie sich seine Effizienz weiter erhöhen und der Ausstoss von Stickoxiden noch stärker vermindern lassen.



Gilles Hardy arbeitet bei FPT Motorenforschung in Arbon darauf hin, Dieselmotoren von Nutzfahrzeugen effizienter und sauberer zu machen.
Foto: B. Vogel

Arbon am Bodensee war im vergangenen Jahrhundert ein Hotspot der Schweizer Industrie. Bis in die 1980er Jahre produzierte der Saurer-Konzern unter anderem Lastwagen (Lkw) und betrieb Spitzenforschung im Bereich der Dieselmotoren. Im frühen 20. Jahrhundert wurden hier unter Mitwirkung von Rudolf Diesel die nach ihm benannten Dieselmotoren für die Anwendung in Nutzfahrzeugen erfunden und später stetig weiterentwickelt. Saurer trug wesentlich dazu bei, dass der Selbstzünder zum bevorzugten Antrieb von Nutzfahrzeugen aufstieg.

Die Lastwagen-Produktion in Arbon ist unterdessen Geschichte. Die Erforschung und Entwicklung von Dieselmotoren blieb allerdings bestehen und wird von der FPT Motorenforschung AG weitergeführt. Dies ist eines von sieben Forschungs- und Entwicklungszentren von FPT Industrial, einem global tätigen Hersteller von Antriebssträngen, der seinerseits zum Investitionsgüter-Konzern CNH Industrial mit weltweit 64'000 Beschäftigten gehört. FPT Motorenforschung beschäftigt in Arbon 250 Personen, hauptsächlich Ingenieure und Mechaniker. Sie erforschen und entwickeln insbesondere Dieselan-

triebe für Lkw sowie Traktoren und Baumaschinen. Für die Verbesserung der Verbrennung, der Abgasnachbehandlung oder der Motorelektronik stehen den Motorexperten nicht weniger als 30 Prüfstände zur Verfügung.

Ein Dieselmotor mit bester Technologie

Dieselmotoren stehen unter dem öffentlichen Druck, effizienter und abgasärmer zu werden. «Um die Zukunft des Dieselmotors als umweltfreundliche Antriebsstrang-Lösung zu sichern, sind weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der Verbrennung und der Abgasnachbehandlung in Kombination mit elektrischer Unterstützung erforderlich», sagt Gilles Hardy, geborener Belgier und Elektro-Mechanikingenieur, der nach Etappen bei der Lkw-Tochter von Toyota, Volvo und dem Schiffsmotorenhersteller Wärtsilä jetzt in Arbon Dieselmotoren erforscht. Dieselmotoren effizienter und abgasärmer zu machen – das war auch das Ziel eines vom Bundesamt für Energie unterstützten Forschungsprojekts, das Gilles Hardy in den letzten vier Jahren mit seinem Team in Arbon zusammen mit der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) durchgeführt hat. Das Projekt unter dem Titel

VIER ARTEN VON VERLUSTEN BEI DIESELMOTOREN

Der Dieselmotor eines Nutzfahrzeugs setzt heute typischerweise rund 40% der im Dieseldieselkraftstoff gespeicherten Energie in mechanische Energie (Fahrleistung/Arbeit) um. Rund 60% der Energie gehen also verloren, und dies an vier Stellen:

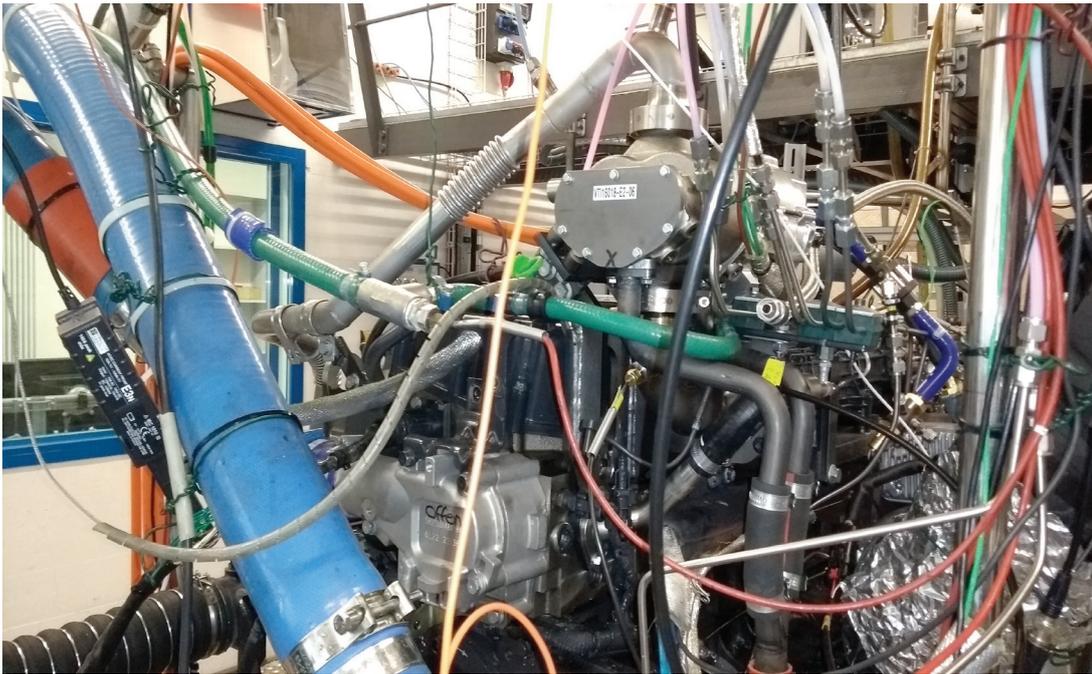
Die **Motorreibung** umfasst die Reibungsverluste zwischen beweglichen Teilen des Motors, aber auch den Energiebedarf für Aggregate wie die Einspritz- oder die Wasserpumpe. Verluste durch Motorreibung beeinträchtigen den Wirkungsgrad des Motors mit einem Faktor $\sim 0,9$.

Die **Ladungswechsel-Verluste** entstehen beim Einströmen von Luft/Treibstoff in den Zylinder bzw. bei Ausströmen der Abgase aus dem Zylinder. Verluste durch Ladungswechsel beeinträchtigen den Wirkungsgrad des Motors nur relativ geringfügig (Faktor ~ 1). Moderne, effiziente Turbolader ermöglichen teilweise sogar Vorteile durch die Ladungswechselschleife (Faktor > 1).

Die **Verbrennungsverluste** entstehen nach der Selbstzündung des Luft-Treibstoff-Gemisches im Zylinder, u.a. durch physikalische Limiten bei Verdichtungsverhältnis sowie der Verbrennungsgeschwindigkeit. Die Verluste, die unmittelbar mit dem Verbrennungsprozess zusammenhängen, beeinträchtigen den Wirkungsgrad des Motors sehr stark (Faktor $\sim 0,6$).

Die **Wandwärmeverluste** entstehen, weil das komprimierte Luft-Brennstoff-Gemisch im Zylinder viel heisser ist als die Umgebung. Daher geht Wärme durch die Zylinderwand an das umgebende Kühlwasser verloren. Wärmeverluste beeinträchtigen den Wirkungsgrad des Motors mit einem Faktor $\sim 0,85$.

Der Gesamtwirkungsgrad des Motors ist das Produkt der einzelnen Wirkungsgrade. BV



Blick auf den Motorenprüfstand: Die AGR-Pumpe ist rechts oben zu sehen. Foto: FPT Motorenforschung

«Wirkungsgradsteigerung von Nutzfahrzeug-Dieselmotoren auf 50%» suchte nach Wegen, um die Antriebstechnologie so zu verbessern, dass ein Dieselmotor die Hälfte der im Kraftstoff gespeicherten chemischen Energie in mechanische Energie (Fahrleistung) umsetzen kann. Heute liegt bei Lkw-Antrieben der thermische Wirkungsgrad – Fachleute sprechen von «Brake Thermal Efficiency» (BTE) – bei 40% im

alltäglichen Teillastbetrieb und bei bis zu 45% im optimalen Betriebspunkt (vgl. Textbox S. 2).

Um ihr Ziel zu erreichen, baute das Forscherteam einen Prüfstand mit einem Dieselmotor auf, der die beste heute verfügbare Technologie versammelt. Der Zylinderkopf war aus einem Spezialmaterial gefertigt, so dass der Zylinderdruck auf

Potenzielle Optimierungsschritte für einen in Nutzfahrzeugen eingesetzten Dieselmotor.
Diagramm: FPT Motorenforschung

Lastpunkt: 1200x75% Einstufiger Turbolader NOx motor aus: BS NOx = 10g/kWh	Motorreibung +WHR Wirkungsgrad [%]	Ladungswechsel- Verluste Wirkungsgrad [%]	Verbrennungs- verluste Wirkungsgrad [%]	Wandwärmeverluste Wirkungsgrad [%]	Gesamtwirkungsgrad [%]
EURO VI ohne AGR (best punkt)	93.1 %	99.0 %	55.7 %	84.9 %	43.6 %
Opt. AGR ohne WHR	95.0 %	99.0 %	59.3 %	84.5 %	47.2 %
Delta (Opt. AGR – EURO VI)	+1.9% point	+0.0% point	+3.6% point	-0.4% point	+3.6% point
Opt. AGR mit WHR (eTurbo)	98.3 %	97.0 %	59.3 %	84.5 %	47.8 %
Delta (eTurbo - Opt. AGR)	+3.3% point	-2.0% point	+0.0% point	0.0% point	+0.6% point
Vorstellung mit eTurbo & TBC	99.0 %	97.0 %	60.0 %	86.8 %	50.0 %
Delta (TBC)	+0.7% point	+0.0% point	+0.7% point	2.3% point	+2.2% point

Hinweis:

WHR: Waste Heat Recovery > Abgasenergienutzung

TBC: Thermal Boundary Coating > Thermische Grenzbeschichtung

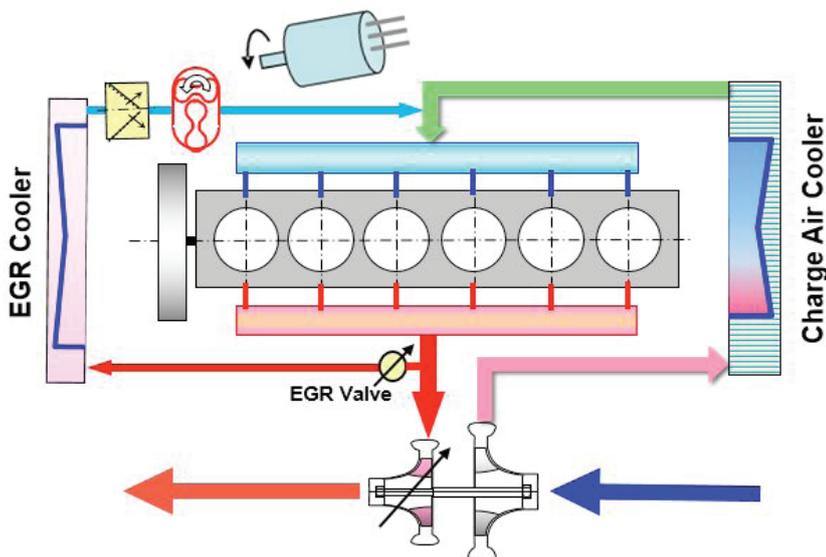
270 bar – 50 bar mehr als in landläufigen Motoren – erhöht werden konnte, was den Wirkungsgrad steigert. Der Motor wurde während insgesamt 500 Stunden für Tests betrieben und dabei drei Mal in grösserem Umfang nachgerüstet. Um sein Verhalten exakt zu vermessen, wurden 1500 Messpunkte definiert. Ein Teil der Tests wurde an der Empa in Dübendorf durchgeführt.

Markante Einsparungen an Treibstoff

Ein Hauptergebnis der Untersuchung: Es lohnt sich, die Geometrie des Brennraums für einen bestimmten Teillastbereich des Dieselmotors zu optimieren. Das bedeutet, dass der Dieselmotor eines 40-Tonnen-Sattelschleppers – um ein Beispiel zu geben – so konstruiert wird, dass der Motor nicht nur auf die Maximalleistung von 350 bis 400 kW optimiert ist, sondern auch auf den Betrieb bei einer Teillast von 100 kW. «Dank Verbesserungen bei der Verbrennung konnten wir den Treibstoffverbrauch um 1 bis 1,5% vermindern (Wirkungsgrad steigt von 45% auf 45,7%). Das senkt beim erwähnten Sattelschlepper (30 l/100 km) den Verbrauch um 0,5 l, was über den Lebenszyklus (1,5 Mio. km) rund 7500 l Treibstoff im Gegenwert von 10'000 Fr. einspart», rechnet Hardy vor. Die am Computer mit CFD-Software entwickel-

ten und durch Motormessungen kalibrierten Änderungen betreffen etwa die Geometrie der Einspritzdüse, das Strömungsverhalten des Luft-Brennstoff-Gemischs im Verbrennungsraum, die Verdichtung der Luft im Zylinder (angehoben von 16,5 auf 20,5) oder die Kolbenform. Einschliesslich Reibungsoptimierung und Verbesserungen am Turbolader konnte der Wirkungsgrad von 43,6% auf 47,2% gesteigert werden (entspricht 8,3% Verbrauchsminderung). In Kombination mit Abgasenergienutzung mittels e-Turbo lassen sich Spitzen-Wirkungsgrade von 47,8% verwirklichen (entspricht 9,6% Verbrauchsminderung). In diesem Fall werden über die gesamte Lebensdauer sogar 43'000 l Treibstoff eingespart.

Ein zweites Hauptergebnis betrifft die Emissionsminderung. Zur Reduktion der Stickoxid-Emissionen sind Dieselmotoren heute mit einem SCR-Katalysator ausgerüstet, der mit der Einspritzung einer Harnstofflösung bis zu 98% der Stickoxide (NO , NO_2) aus den Abgasen entfernt (AdBlue-Verfahren). Die Fahrzeugindustrie erwartet, dass die Stickoxid-Emissionswerte durch künftige EU-Normen (EURO VII) weiter verschärft werden; dann könnte die SCR-Technologie nicht mehr genügen. Vor diesem Hintergrund haben die Ingenieure der FPT-Motorenforschung die Verbesserung eines zusätzlichen



Schematische Darstellung der Abgasrückführung (AGR bzw. engl. EGR): Die aus dem Motor (grauer Block) ausströmenden Abgase (senkrechter roter Pfeil) werden zu einem Teil von der Abgasseite des Motors auf die Luftladeseite des Motors zurückgeführt. Dabei durchströmen sie ein Ventil, einen Kühler, ein Rückschlagventil und die AGR-Pumpe. Die Pumpe ist nötig, weil auf der Abgasseite teilweise ein tieferer Druck herrscht als auf der Luftladeseite. Ein Motor arbeitet teilweise aber auch bei Lastpunkten, wo der Abgasdruck höher als der Ladedruck ist; in diesem Fall kann die AGR-Pumpe sogar Leistung liefern. Die rechte Seite der Grafik veranschaulicht die Energierückgewinnung aus den Abgasen mittels Turbolader. Grafik: BFE-Schlussbericht



Die FPT-Forscher verwenden eine von Eaton entwickelte Pumpe zur Abgasrückführung (Foto). Ihr Energiebedarf kann den Verbrauch des Motors um bis zu 0,5% erhöhen. Allerdings ist in gewissen Betriebszuständen des Motors der Druck auf der Abgasseite des Motors höher als auf der Ladeseite. In diesem Fall kann mit der Pumpe der Energieverbrauch sogar reduziert werden. Foto: Eaton

Verfahrens zur Reduktion der Stickoxidbildung im Brennraum untersucht: die Abgasrückführung (AGR), die in Dieselmotoren von Pkw überwiegend und in Lkw oft eingesetzt wird. Hierbei wird ein Teil des Abgases zurückgeführt und der Frischluft beigemischt, bevor diese in den Verbrennungszylinder gelangt. Durch die Beimischung der Abgase sinkt der Sauerstoffgehalt, wodurch bei der Verbrennung im Motor weniger NO_x entstehen. Die Reduktion des Sauerstoffgehalts birgt allerdings die Gefahr, dass im Motor mehr Russ entsteht. Dies kann verhindert werden, indem die Menge der beigemischten Abgase abhängig vom Betriebszustand des Motors dosiert wird.

AGR-Pumpe ermöglicht Tiefstwerte bei NO_x

Abgasrückführung kann auf verschiedene Arten erfolgen. Gilles Hardy und sein Forschungsteam beschreiten einen neuen Weg, indem sie dafür eine Pumpe benutzen. «Mit der AGR-Pumpe können wir die Menge der zurückgeführten Abgase abhängig vom Betriebszustand des Motors exakt dosieren und damit verhindern, dass vermehrt Russpartikel auftreten. Dank der AGR-Pumpe können wir die NO_x -Emissionen gegenüber einem Dieselmotor ohne AGR um bis zu 50% verringern. Das gibt in Verbindung mit einem SCR-Katalysator eine Reduktion der NO_x von bis zu 99%», sagt Hardy. Allerdings hat die AGR-Pumpe auch einen Nachteil: Weil sie selber Energie braucht, verringert sie den Wirkungsgrad des Dieselmotors geringfügig. Ob dieses Konzept industrialisiert wird, ist zur Zeit noch offen; das hängt von einer Kosten-Nutzen-Abwägung ab, bei welcher der AdBlue-Verbrauch mit einbezogen wird.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts liefern einen Beitrag, um Dieselmotoren effizienter und sauberer zu machen. Um die Effizienz von Lkw-Motoren auf die angepeilten 50% zu bringen, sind aber weitere Schritte nötig, wie Gilles Hardy sagt: «Kleinere Schritte in Richtung dieses Ziels sind möglich durch weitere Verringerung der Motorreibung, durch effizientere Aggregate sowie eine verbesserte Verbrennung und die Steigerung der Turbolader-Wirkungsgrade. Grössere Schritte in Richtung der 50% oder darüber hinaus könnten durch eine Brennraum-Isolation zur Eindämmung der Wandwärmeverluste möglich werden, allerdings sind die erforderlichen Isolationsschichten bislang nicht verfügbar. Der vielversprechendste Ansatz, um die Abgase einschliesslich der CO_2 -Emissionen zu reduzieren sind synthetische Kraftstoffe, die unter Verwendung von erneuerbarer Energie hergestellt werden, etwa Methanol oder DME (Dimethylether).» Die Er-

STROM AUS DER ABWÄRME

Ein Thema des im Haupttext beschriebenen Forschungsprojekts war die Wärmerückgewinnung aus den Abgasen. Aus den bis zu 450 °C heissen Abgasen kann über eine Gasturbine mit angeschlossenem Generator Strom gewonnen werden. Dieser kann dann in Hybridmotoren, wie sie künftig auch bei Lkw zum Einsatz kommen dürften, verwertet werden. Die Ergebnisse dieser Teilstudie seien ernüchternd ausgefallen, sagt Gilles Hardy: «Durch die Wärmerückgewinnung können wir den Treibstoffverbrauch zwar um 2 bis 3 Prozent bei hohen Lasten senken, doch diesem Vorteil stehen erhebliche Investitionskosten gegenüber.» Am ehesten ein Einsatzgebiet sieht der Motorenforscher bei Baumaschinen und Mähreschern, die immer in Vollast laufen und damit am ehesten von dem Effizienzvorteil profitieren. BV

kenntnisse zur Steigerung des Wirkungsgrads und zur Reduktion der Emissionen werden von FPT in einen Nachfolgeprojekt für die Nutzung von synthetischen Brennstoffen genutzt.

- Der **Schlussbericht** zum BFE-Forschungsprojekt «Wirkungsgradsteigerung von Nutzfahrzeug-Dieselmotoren auf 50%» ist abrufbar unter:
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=38622>
- **Auskünfte** zu dem Projekt erteilt Stephan Renz (info[at]renzconsulting.ch), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Verbrennungsbasierte Energiesysteme.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Verbrennung unter www.bfe.admin.ch/ec-verbrennung