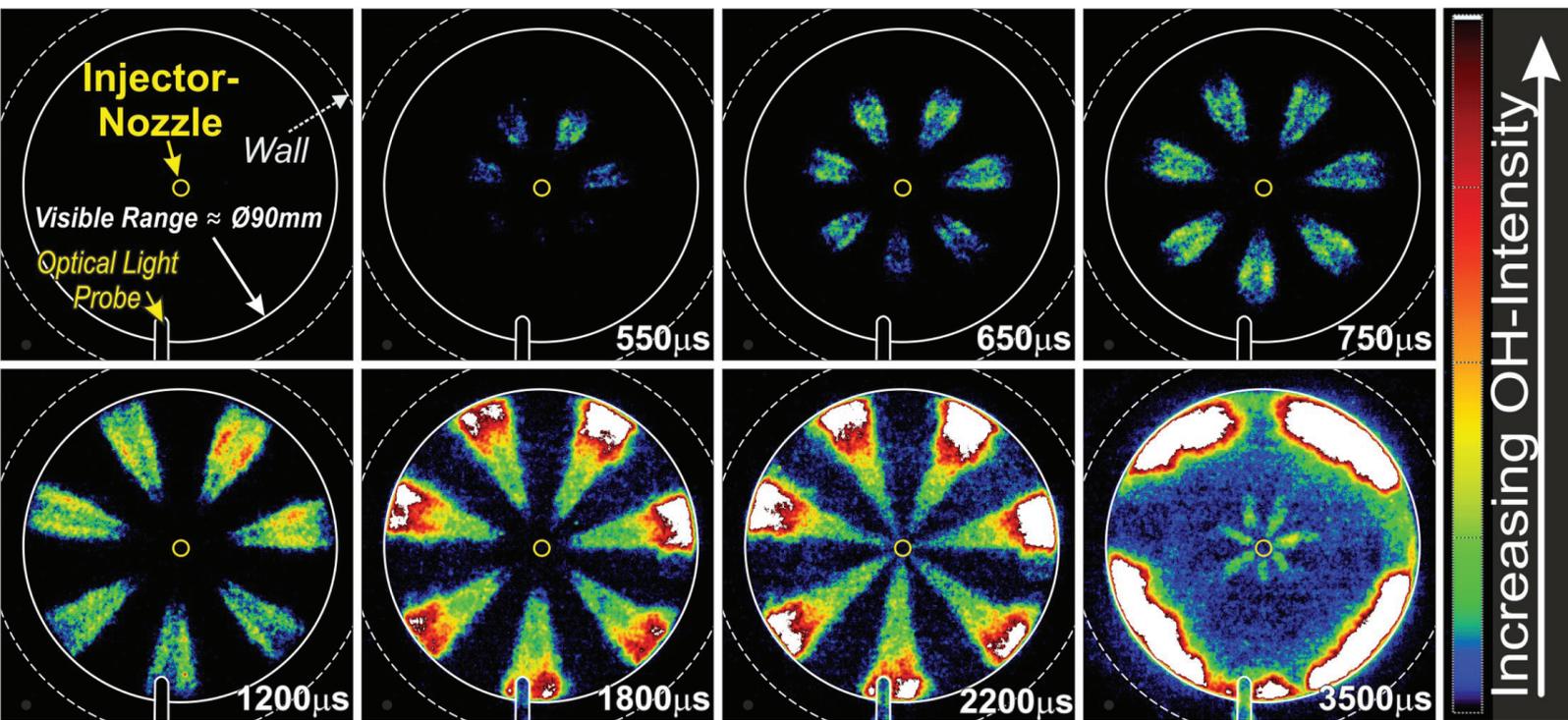


Überblicksbericht 2012

Forschungsprogramm Verbrennung und Wärme-Kraft-Kopplung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

Titelbild:**Einfluss der Brennstoffzusammensetzung auf Einspritzung, Zündung und Brennverlauf**

Für die Validierung numerischer Modelle zur Berechnung der dieselmotorischen Verbrennung sind Versuche an optisch zugänglichen Versuchsträgern notwendig. Im Projekt *CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* wurden in einer Hoch-Temperatur-Druck-Zelle (HTDZ) verschiedene Kraftstoffe untersucht. Aus den OH-Chemilumineszenz-Bildern können relevante Eigenschaften erfasst werden. Die Zündung erfolgt 550 μs nach dem Start der Einspritzung. Bis alle 6 Einspritzstrahle brennen, dauert es 100 μs . Nach 1800 μs ist die Einspritzung abgeschlossen und der restliche Brennstoff verbrennt bis zur Einspritzdüse. Auf dem letzten Bild ist ersichtlich wie der restliche Brennstoff an der Zylinderwand entlang verbrennt und ungewollt zusätzlich Brennstoff aus der Düse strömt und abbrennt. Dies wird durch das Zurückschlagen der Nadel beim Schliessen in der Einspritzdüse verursacht.

BFE Forschungsprogramm Verbrennung und Wärme-Kraft-Kopplung

Überblicksbericht 2012

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):

Stephan Renz, Beratung Renz Consulting (renz.btr@swissonline.ch)

Bereichsleiterin BFE:

Dr. Sandra Hermle (sandra.hermle@bfe.admin.ch)

www.bfe.admin.ch/forschung/verbrennung

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Einleitung

Die Verbrennung ist nach wie vor der weltweit wichtigste Energieumwandlungsprozess, um unterschiedliche Brennstoffe in nutzbare Energieformen wie Wärme, mechanische Arbeit oder Strom umzuwandeln. Der chemisch einfach darstellbare Oxidationsprozess verläuft in der Praxis selbst unter atmosphärischen Bedingungen in der Flamme eines Bunsenbrenners hochkomplex ab. Es bilden sich diverse Zwischenprodukte, nicht gewollte Inhaltsstoffe des Brennstoffes und der Luft nehmen an den Reaktionen teil und es bilden sich schlussendlich Luftfremdstoffe, die wir als Schadstoffe wahrnehmen. Hinzu kommen mit festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen gemischte Strömungen.

Die vielfach wichtigste Anforderung an ein Verbrennungssystem ist möglichst viel des Energieinhalts des eingesetzten Energieträgers in nutzbare mechanische Arbeit umzuwandeln. Damit wird die Wertigkeit des Energieträgers optimal genutzt bzw. es wird ein maximaler exergetischer Wirkungsgrad erreicht. Der Prozess soll zudem mit möglichst geringen Schadstoffemissionen ablaufen. Mit den besten Systemen gelingt es heute, über 60 % des Energieinhalts des eingesetzten Energieträgers in Strom umzuwandeln. Die restlichen 40 % sind Abwärme auf geringem Temperaturniveau, die allenfalls noch für die Beheizung von Wohnräumen genutzt werden kann.

Daraus erkennen wir drei wichtige Herausforderungen an die Verbrennungsforschung: (1) Die Vorgänge im Verbrennungsprozess müssen möglichst gut verstanden und abgebildet werden können, (2) Verbrennungssysteme sollen mit diesem Wissen so simuliert werden können, dass der Prozess optimal abläuft

und nur wenige Schadstoffe entstehen; (3) Verbrennungskraftmaschinen müssen so gebaut und gesteuert werden, damit der Energieinhalt vorwiegend in Arbeit umgewandelt wird und die verbleibenden Schadstoffe durch Abgasnachbehandlungssysteme eliminiert werden können. Schlussendlich ist anzumerken, dass die Herausforderungen für eine zunehmende Anzahl und Komplexität von Brennstoffen beherrscht werden müssen.

Die heute vorwiegend eingesetzten fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Kohle haben den Nachteil der begrenzten Verfügbarkeit sowie der Klima schädigenden CO₂-Emissionen. Auf Biomasse basierende Energieträger sowie aus verschiedenen Stoffen künstlich erzeugte, sogenannte synthetische Brennstoffe, werden in der Zukunft an Bedeutung gewinnen. Hintergrund dieser Entwicklung sind die hohe Energiedichte und die gute Speicherfähigkeit der flüssigen Brennstoffe. Diese sind für viele Anwendungen wie die Mobilität über grosse Distanzen (Transportwesen) oder Produktionsmaschinen mit langer Betriebsdauer (Baumaschinen) im Vergleich zu anderen Energieträgern von grossem Vorteil. In der Zukunft kann auch aus überschüssigem Strom hergestellter Wasserstoff oder synthetisch erzeugtes Methan dazu gehören.

Die Schweiz verfügt über international anerkannte Kompetenzen in der Verbrennungsforschung. Dazu gehören Forschungsinstitute der Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) und an Fachhochschulen aber auch von zahlreichen global agierenden Herstellern von Verbrennungsmotoren und Gasturbinen. Dies ist durch die lange Tradition

der Schweizer Industrie in diesem Bereich, die seit den Anfängen der Entwicklung der Verbrennungskraftmaschinen bahnbrechende Erfindungen hervorgebracht hat, begründet. Auch zahlreiche Entwickler und Hersteller von peripheren Komponenten wie Turbolader, Einspritzsysteme, Katalysatoren, Partikelfilter, Mess- und Steuersysteme sind in der Schweiz aktiv. Pro Jahr investiert die Schweizer Industrie rund 150 Mio. CHF in die Forschung zur Verbesserung von Verbrennungssystemen.

Die Ziele der vom Bund mitfinanzierten Verbrennungsforschung sind die Erhöhung des (exergetischen) Wirkungsgrads von Verbrennungssystemen, die Verminderung des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen und damit der CO₂-Emissionen sowie die Reduktion der Schadstoffe wie Russ, Feinstaub, Stickoxid oder Kohlenwasserstoffe. Hinzu kommt die Optimierung von Verbrennungssystemen für Energieträger aus Biomasse der 2. Generation sowie synthetisch hergestellte Brennstoffe. Die Forschungsziele stimmen auch gut mit den internationalen Bestrebungen überein. Dies wird durch die Forschungsschwerpunkte der Verbrennungsfachgruppe der Internationalen Energieagentur (IEA) [1] bestätigt. Schweizer Forschende sind an mehreren Projekten beteiligt. Im Forschungsprojekt *HERCULES* der Europäischen Union (EU) [2] arbeiten verschiedene Institute des ETH-Bereichs, von Fachhochschulen und Schweizer Industrieunternehmen mit EU-Partnern zusammen. Auch in Forschungsprojekten der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [3] sind mehrere Industrieunternehmen und Schweizer Hochschulforscher engagiert.

IEA Klassifikation: 2.1.4 Oil and gas combustion

Schweizer Klassifikation: 1.8 Verbrennung

Programmschwerpunkte

Die Zielsetzungen der Programme *Verbrennung* und *Wärme-Kraft-Kopplung (WKK)* richten sich nach den Vorgaben des Energieforschungskonzepts des Bundes [4].

Verbesserte Forschungsmethoden und -instrumente: Die Instrumente der Forschung wie physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger sind weiter zu entwickeln und an neue Anforderungen anzupassen.

Erhöhung des Systemwirkungsgrads: Der Brennstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen werden dadurch reduziert. Wichtig ist der Einbezug des Gesamtsystems und der unterschiedlichen Lastzustände.

Reduktion von Schadstoffemissionen: International werden die Emissionsvorschriften für Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxide sowie Russ und Feinstaub weiter verschärft.

Nutzung verschiedener Energieträger: Zur Verbesserung des Wirkungsgrads und zur Reduktion der Schadstoffe wird auch die Zusammensetzung der Brennstoffe geändert. Hinzu kommt die zunehmende Nutzung von biogenen Brennstoffen.

Effizienzverbesserung bei WKK-Anlagen: Erhöhung des Wirkungsgrads des Gesamtsystems inklusive Abwärmenutzung und Einsatz erneuerbarer Brennstoffe.

Schwerpunkte der Periode 2008–2012:

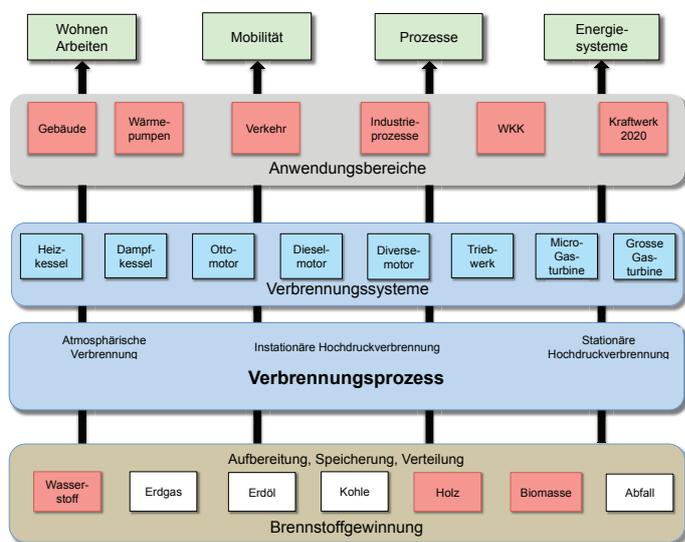
- Weiterentwicklung der Forschungsmethoden und -instrumente für konventionelle und für biogene Energieträger.
- Verbesserung und stärkere Vernetzung der experimentellen und numerischen Methoden für die Optimierung des Gesamtsystems «Motor», welches die Prozesskette Gemischbildung–Zündung–Verbrennung–Abgasnachbehandlung umfasst.
- Darstellung von «Null-Emission-Systemen» für die kleinskalige (10 kW bis 100 kW) kombinierte Strom–Wärme–Kälte–Erzeugung.
- Senkung der Wartungskosten von WKK-Anlagen und Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Steuerung und Diagnose.
- Optimierung von Gemischaufbereitung, Verbrennung und Abgasnachbehandlung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim (Teil-)Einsatz von biogenen Kraftstoffen auch für kleinskalige atmosphärische Systeme.
- Stärkere Vernetzung und Auftritt der Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung und -industrie inkl. Leistungserbringern von Komponenten.

Rückblick und Bewertung 2012

Verschiedene Projekte konnten erfolgreich abgeschlossen werden; so z. B. das Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für Dieselmotoren*, in dem ein virtueller Russensensor entwickelt wurde. Dadurch wird es möglich, durch Eingreifen in die Motorsteuerung die Russentwicklung zu reduzieren. Im Projekt *CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* wurden Rechenmodelle für die Vorhersage der Energieumwandlung und der Emissionsbildung entwickelt. In Ergänzung zum laufenden EU-Projekt *HERCULES* wurde im Projekt *Spray Combustion Chamber von Grossdieselmotoren* der Versuchsträger verbessert, die Messsysteme ausgebaut und Versuche mit Schweröl gefahren. Neue Projekte wurden zur Charakterisierung von synthetischen Kraftstoffen für die Dieselmotoren sowie für die Entwicklung von Modellen für die emissionsarme Verbrennung biogener Kraftstoffe gestartet.

Ausblick

Durch eine weitere Auflage der alle zwei Jahre stattfindenden Tagung *Verbrennungsforschung in der Schweiz* [5] soll der Stand der Forschungsaktivitäten an Hochschulen und in der Industrie dargestellt und das Netzwerk der diversen Akteure gestärkt werden. Im IEA Implementing Agreement Combustion [1] wird ein Vorschlag für einen neuen Collaborativ-Task mit Schweizer Beteiligung zum Thema *Natural Gas Engines* eingereicht. Zudem sollen zum Thema *Dual Fuel* Forschungsaktivitäten gestartet werden. Damit soll das Wissen über Verbrennungsmotoren, welche gasförmige und flüssige Brennstoffe nutzen können, weiterentwickelt werden. Interessant wird sein, ob der angestrebte elektrische Wirkungsgrad von 35 % im Projekt *Klein-WKK-Anlage mit Null-Schadstoffpotenzial* erreicht werden kann. Das Ziel ist, in einem nächsten Schritt eine Pilotanlage zu realisieren. Im Forschungsbereich WKK sollen zudem Wärmekraftmaschinen für die Nutzung der Energie aus der Holzverbrennung weiter untersucht werden. Hinzu kommen ähnliche Systeme zur Nutzung der Abgasenergie aus Verbrennungsmotoren.

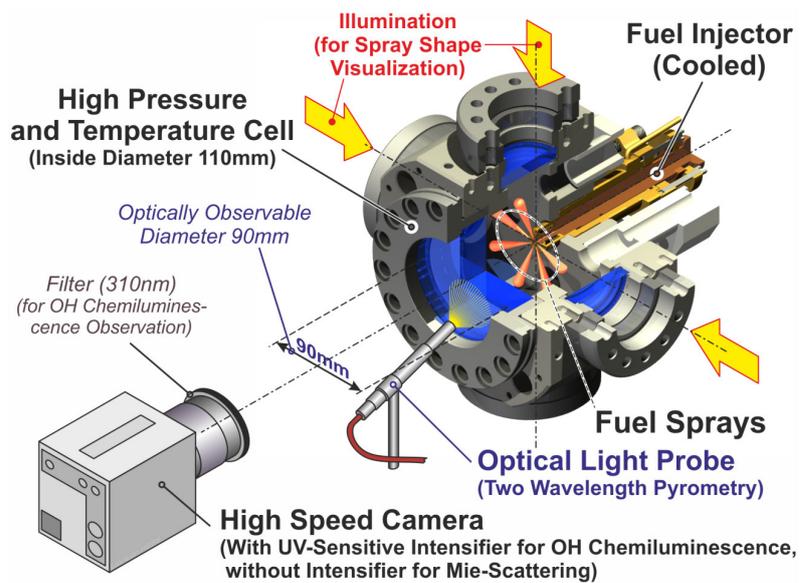


Querschnittstechnologie Verbrennung: Vernetzung mit Forschungsprogrammen des BFE (rot) und den Schwerpunkten des Forschungskonzepts des Bundes (grün).

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Die an die Verbrennungsforschung gestellten Anforderungen wurden in den letzten Jahren erheblich gesteigert, wodurch die Herausforderungen an die Forschung vielfältiger und umfangreicher geworden sind. Ein Beispiel ist die Euro VI Norm [6], die ab 2013/14 bei schweren Motorfahrzeugen den Grenzwert für Stickoxidemissionen gegenüber 2008/09 um den Faktor 5 tiefer vorschreibt. Gleichzeitig werden höhere Wirkungsgrade der Motoren angestrebt, damit diese weniger Brennstoff verbrauchen und entsprechend die CO₂-Emissionen reduzieren. Die Reduktion der Schadstoffe durch innermotorische Massnahmen und die Verbesserung des Wirkungsgrads sind jedoch gegenläufige Bestrebungen. Die Forschung in der Industrie ist deshalb bereits durch die gesetzlichen Vorgaben gefordert und steht in einem hoch spezialisierten Markt im internationalen Wettbewerb.

Mit der Förderung durch das BFE können Projekte angegangen werden, die auch grundlegende oder neuartige Aspekte der Verbrennungsforschung betreffen. Dazu gehören die Untersuchung der Energiefreigabe der Moleküle im Zündprozess, die Entwicklung von numerischen Simulationsmodellen für biogene Brennstoffe, neuartige Brennverfahren sowie die Schadstoffbildung. Der Aufbau von Versuchsträgern für das Generieren von Messdaten und die Validation der Modelle, aber auch die Verbesserung von einzelnen Komponenten bis zum gesamten System sind weitere Forschungsbereiche. Projekte haben oft mehrere Themen zum Inhalt und fokussieren nicht nur auf eine Zielsetzung sondern auf Kombinationen davon. Damit kann einerseits die mit hohen Kosten verbundene Erfassung von Daten aus Experimenten für verschiedene Aspekte ausgewertet und genutzt werden. Andererseits wird die vorgenannte Interdependenz von Schadstoffreduktion und Wirkungsgrad besser berücksichtigt und nicht eine einseitige Optimierung vorgenommen. Wie verschiedene Beispiele auch im Berichtsjahr wieder gezeigt haben, finden die Ergebnisse aus den vom BFE unterstützten Projekte eine Fortschreibung und Anwendung in der Industrie.



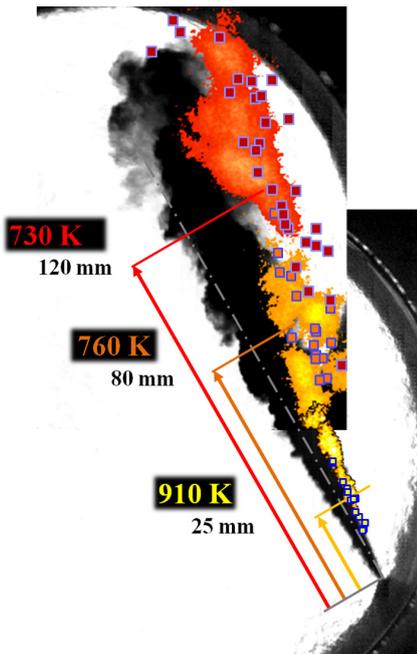
Figur 1: Darstellung der Hochtemperatur-Druck-Zelle der ETHZ, an der Einspritzvorgänge mit 6 verschiedenen Fischer-Tropsch-Brennstoffen durchgeführt wurden.

CRFD-Modell erfolgreich für neue Brennstoffe und Brennverfahren weiterentwickelt

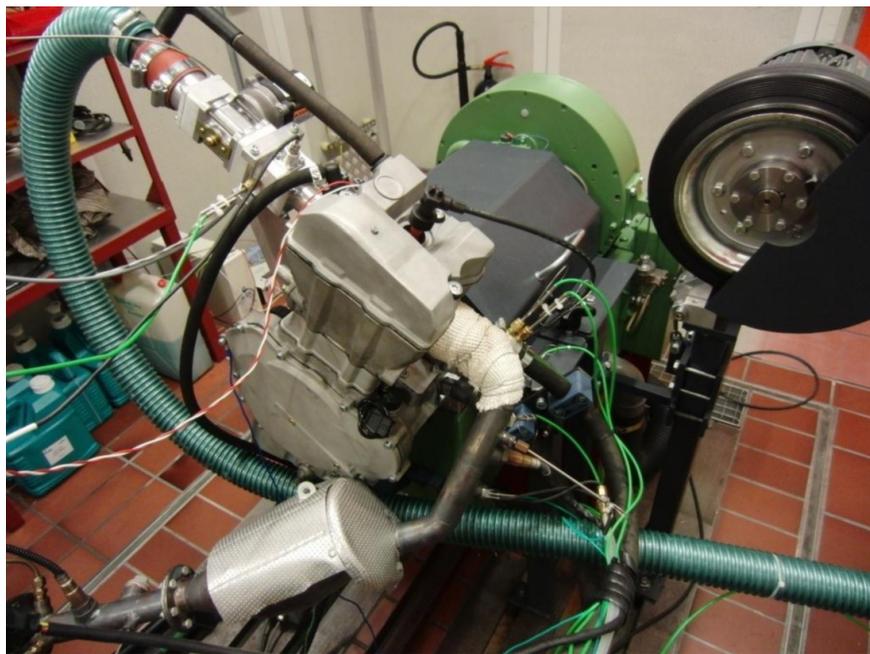
Die Verfügbarkeit von möglichst genauen prädiktiven Simulationswerkzeugen ist für die Verbesserung von Verbrennungssystemen unerlässlich. Die computergestützten Rechenmodelle müssen jedoch laufend an neue oder geänderte Brennverfahren sowie neuartige Brennstoffe angepasst und weiterentwickelt werden. Im Projekt *CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* wurden am LAV (Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme) der ETHZ [7] in mehreren Arbeitspaketen Experimente mit verschiedenen Brennverfahren und Brennstoffen durchgeführt. Die gewonnenen Daten wurden für die Verbesserung von vorhandenen Rechenmodellen genutzt. So wurden an einem als Versuchsträger umgebauten 1-Zylinder-Industriemotor Niedertemperaturbrennverläufe, wie sie für Miller-Brennverfahren typisch sind, untersucht. Hinzu kamen Versuche mit verschiedenen Einspritzdrücken und -verläufen. Daraus wurden umfangrei-

che Messreihen generiert, die anschliessend auch in einem KTI- sowie in einem CCEM-Projekt verwendet werden.

An einer optisch gut zugänglichen Hochtemperatur-Druck-Zelle (HTDZ) (Figur 1) wurden 6 verschiedene Fischer-Tropsch-Brennstoffe sowie ein synthetischer Dieselmotorenstoff als Referenzgröße untersucht. Erfasst wurden der Einspritzprozess, die Versprühung, die Zündung und die Verbrennung (Titelbild). Dieser Projektteil wurde in Zusammenarbeit mit dem Projekt «Futur Fuels for Diesel» der FVV [8] realisiert. Weiter Experimente wurden mit Dieselpilot-Einspritzungen zur Zündung eines Methan-Luftgemisches durchgeführt. Dafür wurde ein Einhubtriebwerk (EHT) verwendet. Es wurden robuste optische und transiente Daten der resultierenden Zweistoffverbrennung erfasst und ein Abgleich des entwickelten Verbrennungsmodells für «Dual Fuel Combustion» realisiert. Dabei wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment erzielt. Das Projekt wurde auch im Zusammenhang mit den Forschungsvorhaben «Piloteinspritzung» und «Miller/Atkinson» der FVV [9] bearbeitet.



Figur 2: Einfluss der Verbrennungslufttemperatur auf Zündverzug, Zündort und Flammausbreitung. Die eingetragenen Punkte zeigen die Zündorte verschiedener Messungen und die Distanzangaben die Entfernung des gemittelten Ortes der Zündung von der Spitze der Einspritzdüse. Bei höherer Temperatur zündet der Brennstoff näher bei der Einspritzdüse und ist durch den Drall im Brennraum noch weniger abgelenkt.



Figur 3: 1-Zylinder-Motor von Swissauto Wenko AG auf dem Prüfstand mit einer Schenk Wirbelstrombremse zur Belastung und Messung der Leistung. Der Motor wurde von Benzinbetrieb auf den Betrieb mit Erdgas umgebaut.

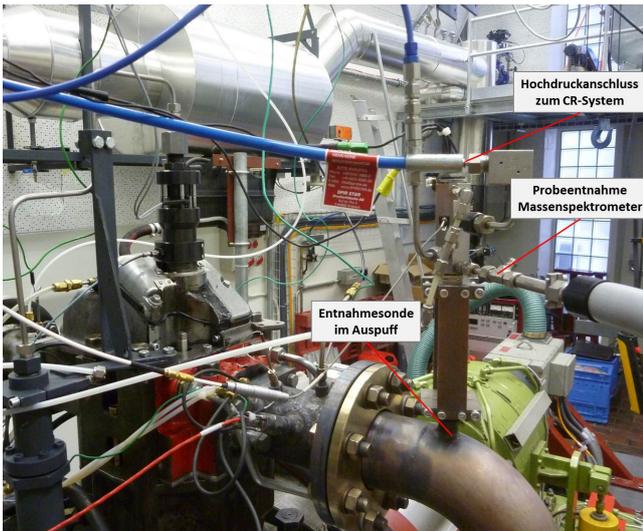
Mit den Datensätzen aus den vorgeannten Versuchen, dem Projekt *HERCULES* und in der Literatur dokumentierten Daten wurde die CRFD-Simulation weiterentwickelt. Das Rechenmodell basiert auf der kommerziellen CFD-Software Star CD, die durch das an der ETH weiterentwickelte Conditional Moment Closure Verbrennungsmodell ergänzt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem CMC-Modell eine breite Palette von physikalischen Prozessen der selbstgezündeten Verbrennung erfolgreich dargestellt werden kann. In einem 2012 gestarteten Projekt sollen detaillierte Reaktionskinetiken von diversen biogenen und synthetischen Brennstoffen in das CMC-Modell miteinbezogen werden.

Hohe Effizienz und geringe Schadstoffemissionen für Motoren aus der Schweiz

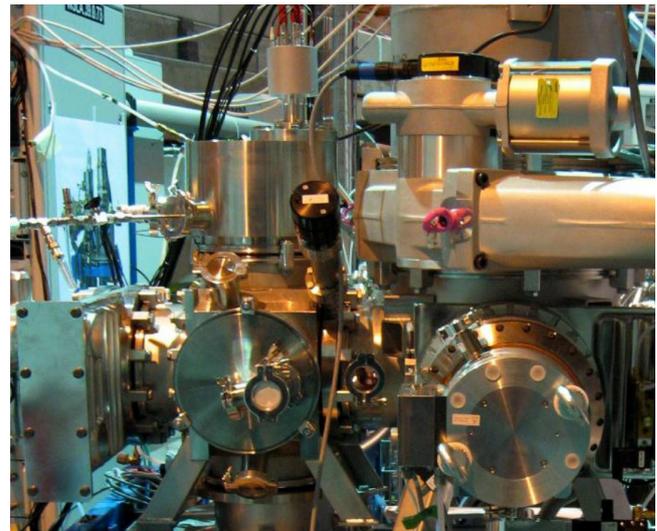
In der Schweiz sind mehrere international tätige Motorenhersteller aktiv. So fabriziert der weltweit tätige Baumaschinenhersteller Liebherr [10] seine Motoren seit 1984 in Bulle. 2012 präsentierte Liebherr eine neue Serie Gasmotoren, die für den stationären und mobilen Einsatz konzipiert sind. In verschiedenen vom BFE mitfinanzierten Projekten werden Liebherr-Motoren eingesetzt (*Schnelle Messverfahren*) oder die Firma leistet direkt einen Beitrag (*GasPot*). Die zum Fiat-Konzern gehörende Fiat Power Train [11] (Iveco bzw. ehemals Saurer) produziert zwar in der Schweiz keine Motoren mehr, betreibt aber in Arbon ein grosses Entwicklungszentrum für Dieselmotoren mit 30 Prüfständen.

In Winterthur entwickelt Wärtsilä Schweiz AG (ehemals Sulzer) [12] die

weltweit zu den grössten zählenden Schiffsdieselmotoren mit einem Hubraum von maximal 25'000 Litern und einer Leistung von 80'000 kW. Die Motoren erreichen einen mechanischen Wirkungsgrad von über 50 % und nutzen als Brennstoff Schweröl, das aus nicht mehr verdampfbaren Rückständen der Erdölverarbeitung stammt. Problematisch sind dabei die Schadstoffemissionen, die durch neue Vorschriften in küstennahen Gebieten massiv gesenkt werden müssen. Für Motoren in diesen Dimensionen sind primär innermotorische Massnahmen anzustreben. Im Rahmen des EU-Projekts *HERCULES* entwickelte Wärtsilä [in Zusammenarbeit mit der ETHZ] einen Versuchsträger, welcher den Brennraum eines grossen 2-Takt-Dieselmotors mit einer Bohrung von 500 mm darstellt. Neben Wärtsilä und der ETHZ sind in diesem EU-Projekt auch ABB Turbosystems [13], das PSI [14] und die Empa [15] involviert. In Ergänzung dazu unterstützte



Figur 4: Eingebaute Gas-Entnahmesonde im Auslasssystem des Einzylindermotors.



Figur 5: Imaging-Photoion-Photoelectron-Coincidence (iPEPICO)-Messeinrichtung an der SLS/VUV-Beamline. Damit können Messungen der kinetischen Energie von Ionen-Fragmenten durchgeführt werden. Diese Eigenschaft ist relevant um die thermochemischen Daten für Moleküle zu bestimmen, die vor der Dissoziation zuerst isomerisieren.

das BFE im nun abgeschlossenen Projekt *Spray Combustion Chamber von Grossdieselmotoren* zusätzliche Forschungsarbeiten. Projektinhalte waren das Zündverhalten verschiedener Brennstoffe (von Dieselkraftstoff bis zu Schweröl), die Erweiterung der Anlage durch neuartige Komponenten wie Probenahmesonde und Schaugläser, die Verbesserung der Einspritzdüsen und die Weiterentwicklung der optischen Messtechniken. Die Einspritzung von Schweröl in einem Versuchsträger war eine besondere Herausforderung. So musste ein komplett neues Einspritzsystem aufgebaut und die Anlage nach jedem Versuch gereinigt werden. Unter der Variation der Gasdichte wurden mit Hilfe von Schattenbildern die räumliche Ausbreitung, die Eindringtiefe und der Winkel des Sprays vermessen. Die Messtechnik wurde erweitert, um mit schmalbandigem UV-Filter das Zündverhalten zu erfassen (Figur 2). Um die Messresultate nicht zu verfälschen, musste bei der Schwerölverbrennung das Inkandeszenzsignal des Russes mitbestimmt werden. Mit der Phasen-Doppler-Anemometrie konnte die Tropfengröße und -geschwindigkeit im Spray vermessen werden. Aus den zahlreichen Experimenten konnten große Datenmengen gewonnen werden,

die für die Weiterentwicklung der Computersimulation genutzt werden. Zudem wurden aus den visualisierten Ergebnissen Erkenntnisse gewonnen, die direkt in die Entwicklung der Einspritzsysteme bei Wärsilä eingeflossen sind. Neben den Forschungsarbeiten im Rahmen des *HERCULES*- und des BFE-Projekts wird die *Spray Combustion Chamber* heute für zahlreiche umsetzungsnahe Untersuchungen von Wärsilä eingesetzt.

Interessant sind auch die Aktivitäten der Firma Wenko [16] aus Burgdorf. Sie entwickelt ihren 1-Zylinder-Motoren, den sie bisher für den Einsatz in Freizeitfahrzeugen herstellte, für die Nutzung als Range-Extender in Elektrofahrzeugen und neuerdings in Zusammenarbeit mit Motorex [17] und dem LAV der ETHZ für ein kleines WKK-System weiter. Im Projekt *Klein-WKK-Anlage mit Null-Schadstoffpotenzial* wird ein solcher 1-Zylinder-Motor mit 0,325 Litern Hubraum (Figur 3) am LAV ETHZ für den stationären Einsatz und die Nutzung von Biogas als Brennstoff angepasst und optimiert. Die Ziele mit einer Kleinanlage einen Wirkungsgrad von 35 % und einen Gesamtwirkungsgrad (inkl. Wärmenutzung) von 90 % bei minimalen Stickoxiden (< 50 mg/Nm³) zu erreichen sind im

Vergleich zum Stand der Technik (26 %) hoch gesteckt. Im Forschungsprojekt wurde bisher bereits ein mechanischer Wirkungsgrad von 33 % erreicht und es wurden weitere Optimierungsmöglichkeiten festgestellt.

Reduktion der Emissionen durch virtuellen Russensor

Die Russbildung und die Russemissionen sind der Hauptnachteil des dieselmotorischen Brennverfahrens. Durch die laufend verschärften Vorschriften wurden Abgasmachbehandlungssysteme wie der Dieselpartikelfilter entwickelt und die Emissionen in vielen Anwendungsbereichen von Dieselmotoren erheblich gesenkt. Um die Rohemissionen der Motoren zu reduzieren und damit die Abgasmachbehandlungssysteme zu entlasten, müssen die Betriebsparameter wie Einspritzzeitpunkt, -mengen und -häufigkeit oder Abgasrezirkulation verändert werden. Im stationären Betrieb kann dies recht gut beherrscht werden. Problematisch ist der transiente Betrieb der Motoren. Dabei kann eine starke Russbildung entstehen, die zudem von Zyklus zu Zyklus unterschiedlich ist.

Im Projekt *Schnelle Mess- und Rechenverfahren für energieeffiziente Dieselmotoren* des LAV der ETHZ wurde eine zyklusgenaue Erfassung der Russbildung angestrebt und verschiedene Motorparameter analysiert und Zusammenhänge geprüft. An einem Heavy-Duty-1-Zylinder-Versuchsmotor (Figur 4) wurde dazu ein schnelles Gasentnahmeventil eingesetzt, das in einem früheren vom BFE unterstützten Projekt entwickelt wurde. Es gelang zyklusgenau Gasproben aus dem Zylinder zu entnehmen und einem Massenspektrometer zuzuleiten. Die Auswertung der Messdaten dauerte jedoch deutlich länger (30 ms) als die Probenahmen (1,5 ms) weshalb keine kontinuierliche Messung über eine Vielzahl von Zyklen durchgeführt werden konnte. Gute Ergebnisse wurden mit einem Drei-Wellenlängen-Pyrometer (Optical Light Probe, OLP) erzielt, das im selben Motor zur Anwendung kam. Das Messsystem wurde in Zusammenarbeit mit Kistler Instrumente AG [18] im Rahmen eines KTI-Projekts entwickelt und konnte nun erfolgreich eingesetzt werden. Es wurde eine gute Übereinstimmung der mittels OLP im Zylinder prognostizierten Russbildung und der im Auspuff gemessenen Russmenge gefunden. Damit wurden Abhängigkeiten unterschiedlicher Motor-einstellparameter auf die Russbildung im stationären und im transienten Betrieb untersucht. So wurden beispielsweise Einflüsse der Einspritzung (Zeitpunkt, Menge, Anzahl) oder der rezirkulierten Abgase festgestellt. Wichtig war die Erkenntnis, dass nur wenige Arbeitszyklen des Motors für hohe Russemissionen verantwortlich sind.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen und einem am LAV erarbeiteten Russmodell wurde ein virtueller Russsensor entwickelt. Mit dem Russsensor können die Russemissionen aufgrund von Steuergerätevariablen und aus Zylinderdruckdaten gewonnenen charakteristischen Verbrennungsgrößen, zyklus aufgelöst und online prognostiziert werden. Der Russsensor wird mit Abgas-Russmessungen kalibriert und zeigt die im stationären Betrieb resultierende Russbildung sehr gut und ist in der Lage transiente Effekte genügend genau wiederzugeben. Damit lassen sich die Motorparameter nachjustieren und die Russbildung reduzieren. Das in Zusammenarbeit mit der FVV realisierte Projekt stiess auf grosses Interesse der Industrievertreter und soll in einem Folgeprojekt weiterentwickelt werden.

Reaktionen im Mikrobereich

Die Reaktionsmechanismen der Verbrennung finden im Mikrobereich statt. Dazu gehören die Strömung, die Verwirbelung und die Durchmischung der Moleküle vor der Zündung und die Energiefreigabe im Zündprozess. Der Zündvorgang hat einen grundlegenden Einfluss auf den Verlauf der Verbrennung und damit die Entwicklung von Schadstoffen, insbesondere von Russ. Das Zündverhalten wird weitgehend durch Peroxy-Radikale bestimmt. Sie beeinflussen die Art und die Zusammensetzung der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung der nachfolgenden Reaktionen.

Die thermochemischen Daten von Radikalen erreichen bisher eine zu geringe «chemische» Genauigkeit. Diese schlägt sich in den Simulationsmodellen in der Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeit nieder, die innerhalb eines Faktors 10 liegen kann. Damit ist beispielsweise die Entstehung von Stickoxid kaum verlässlich modellierbar. Zur genauen Bestimmung der energetischen und molekularen Zustände (Spinrotationen) der Radikale werden im Projekt *Molecular Data of Combustion relevant Radicals* am PSI spektroskopische Methoden eingesetzt. Die Herausforderungen sind die Präparation der Radikale in einem Molekularstrahl in ausreichender Dichte (Radikalenquelle) sowie das Beherrschen der Messmethoden zur Bestimmung der Energiefreigabe im exothermen Dissoziationsprozess. Um die Spinrotationen der C_2 und C_3 Radikale bestimmen zu können, wird eine spektroskopische Femtosecond-Two-Colour-Four-Wave-Mixing-Messmethode eingesetzt. Damit ist es erstmals gelungen, deren Triplett-Zustände zu messen. Bei hohen Temperaturen sind diese für die Entstehung von Russ verantwortlich. An der SLS/VUV-Beamline [19] wurde zudem ein iPEPICO-Messaufbau (imaging Phot Electron Photo Ion Coincidence) installiert (Figur 5). Dieser verfügt über bildgebende Detektoren, mit denen die Geschwindigkeit der erzeugten Fragmente und somit die Energie bestimmt werden kann. An den Versuchs- und Messeinrichtungen arbeiten auch andere Forschergruppen, woraus zusammen mit den Engagement in der COST Action CM0901 [20] wertvolle Synergien entstehen.

Nationale Zusammenarbeit

Die Forscherteams der Schweizer Verbrennungsforschung pflegen über zahlreiche gemeinsame Projekte gute Kontakte und dies auch zwischen Hochschulen und Industrie. Dies gilt auch für die vom BFE mitfinanzierten Arbeiten. Zu nennen sind das Projekt *HERCULES*, in dem die ETHZ, das PSI sowie Wärtsilä Schweiz AG und ABB Turbosystems AG Partner sind. Zahlreiche Industriepartner sind auch im Projekt *Schnelle Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselmotoren* direkt oder indirekt involviert. Dazu gehören Kistler Instrumente AG, FPT Motorenforschung AG und Liebherr Machines Bulle SA. Das Projekt *CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* ist Teil des vom CCEM geführten Projekts Clean Efficient Large Diesel Engine (CELaDE) [21] in dem eine Zusammenarbeit zwischen der ETHZ, dem PSI und der Empa erfolgt. Im Projekt *Klein-WKK-Anlage mit Null-Schadstoffpotenzial* arbeiten das LAV ETHZ, Wenko AG und Bucher AG Motorex zusammen. Das neu gestartete Projekt *Kraftstoffkennzahlen II* wird von der Erdöl Vereinigung mitfinanziert. Eine breite Schweizer

Forschungszusammenarbeit erfolgt auch im neuen Projekt *GasPot* (MEMS, Liebherr, Empa und Mitfinanzierung FOGA) sowie im Projekt *Xhost Harvester II* (Oekozentrum, Liebherr Machines Bulles SA, Walter Schmid). Im Projekt *Design, operating strategies and potenzial of a biogenic CHP swarm* findet eine Zusammenarbeit verschiedener ETH-Institute statt. Das Projekt wird durch SwisselectricResearch [22] sowie die BFE-Forschungsprogramme *Biomasse* und *Holzenergie, Netze und WKK* finanziert.

Jährlich wird an der ETHZ die *Conference on Combustion Generated Nanoparticles* [23] die Problematik der durch die Verbrennung erzeugten Partikel interdisziplinär behandelt. Die Themen der Referate spannten den Bogen von der Partikelentstehung in der Verbrennung, über die Abgasnachbehandlung, zur Messtechnik sowie zu den atmosphärischen Vorgänge und zu den biologisch-medizinischen Wirkungsaspekten. Die vom LAV ETHZ mit TTM A. Mayer organisierte Veranstaltung findet national und international bei technisch wie auch medizinisch orientierten Fachleuten grosses Interesse.

Internationale Zusammenarbeit

In mehreren vom BFE unterstützten Projekten erfolgt eine internationale Zusammenarbeit mit Hochschulen und Industriepartnern. Dazu gehört das von der EU im Rahmen des Forschungsrahmenprogramms FP7 mitfinanzierte Projekt *HERCULES*: Neben den bereits erwähnten Schweizer Forschungsinstitutionen und Industriepartnern sind auch die Abo Akademi University (FIN), die Helsinki University of Technology (FIN), die National Technical University of Athens (GR) sowie die Wärtsilä Corporation Finnland beteiligt. Das Projekt *Klein-WKK-Anlage mit Null-Schadstoffpotenzial* enthält ein Arbeitspaket *AGR bei Gasmotoren mit extremen Steuerzeiten*, das im Auftrag der FVV erfolgt und zusammen mit dem Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der TU München bearbeitet wird. Auch das Projekt *CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* wird parallel zu Projekten der FVV bearbeitet, mit entsprechender Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen in Deutschland. Im Projekt *Molecular data of combustion relevant radicals* bestehen gute Kontakte zu Forschergruppen an der ETHZ und an den Universitäten Basel und Bern. Ein Austausch findet zudem statt mit den Universitäten Würzburg (D), Birmingham (GB), Iceland (IS) und der University Of The Pacific (US), die ebenfalls an der VUV Beamline des SLS arbeiten. Das Projekt ist in der COST Action 901 der EU, in der sich Gruppen von mehr als 20 Ländern austauschen, aufgenommen. Im NCCR-MUST [24]

wird in Zusammenarbeit mit der Universität Zürich an den ultraschnellen Messtechniken gearbeitet.

Ein wichtiger Informationsaustausch und die Gelegenheit, die Schwerpunkte der Verbrennungsforschung international mitzugestalten, erfolgt in der Mitarbeit in Arbeitsgruppen der Internationalen Energieagentur (IEA). Für die Verbrennung relevant sind das Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion (IEA Combustion), die Working Party for Fossil Fuels (WPF) [25] und das Implementing Agreement Advanced Motor Fuels [26]. Die Schweiz ist in diesen Arbeitsgruppen vertreten.

Grössere Aktivitäten von Schweizer Forschenden erfolgen im IEA Combustion. Deren Ziel ist, die Entwicklung von Verbrennungstechnologien, die einen verminderten Brennstoffverbrauch und geringere Emissionen aufweisen, voranzutreiben. Die Forschungsthemen werden in sogenannten Collaborative Tasks bearbeitet. Dazu gehören Gas Turbines, Sprays in Combustion, Alternative Fuels in Combustion und Nanoparticle Diagnostics zu denen Schweizer Forschende Beiträge leisten sowie Hydrogen Internal Combustion Engines und Homogeneous Charge Compression Ignition. Die Mitarbeit der Schweiz sichert eine Vertretung der Interessen im Bereich Verbrennung, eine Mitwirkung bei der Festlegung zukünftiger Schwerpunkte, die Vermitt-

lung Schweizerischer Forschungsergebnisse, die Bekanntmachung der Firmen aus der Schweiz sowie die Weitergabe der Informationen über internationale Aktivitäten an Interessierte in der Schweiz. Im IEA Combustion sind 12 Mitgliedsländer vertreten.

Im IEA AMF Agreement hat die Schweiz 2012 den Vorsitz übernommen und ist in Arbeitsgruppen vertreten. Das IEA AMF will die internationale Forschungsnetzwerke bei der Erforschung und Entwicklung, bei der Implementierung und Verbreitung von sauberen, energieeffizienten und nachhaltigen Treibstoffen und den damit zusammenhängenden Fahrzeugtechnologien fördern.

Bei den zur WPPF gehörenden Implementing Agreements *Greenhouse Gas R&D Programme*, *Enhanced Oil Recovery* und *das IEA Clean Coal Centre* sind die Verbesserung des Wirkungsgrads von grossen mit fossilen Brennstoffen befeuerten Kraftwerken und in diesem Kontext Verfahren zur Elimination des CO₂ wichtige Themen. In aktuellen Überlegungen fliessen auch Aspekte der Nutzung von CO₂ mit ein. Die Schweiz hat 2012 intensiv an der Ausarbeitung eines neuen Implementing Agreement Gas and Oil Technologies (GOT IEA) mitgewirkt.

Referenzen

- [1] IEA IA Combustion (www.ieacombustion.net).
- [2] High-efficiency Engine R&D on Combustion with Ultra-low Emissions for Ships (HERCULES), EU-FP7.
- [3] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (www.fvv-net.eu)
- [4] Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2012.
- [5] BFE, LAV, PSI: Tagung «Verbrennungsforschung in der Schweiz», 2011.
- [6] EU Emission Standards for HD Diesel Engines: VERORDNUNG (EG) Nr. 595/2009.
- [7] Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme, ETHZ (www.lav.ethz.ch).
- [8] Futur Fuels for Diesel, FVV, 2012.
- [9] Piloteinspritzung, Miller/Atkinson, FVV, 2012.
- [10] Lieberherr Machines Bulles SA, (www.liebherr.com)
- [11] FPT Motorenforschung AG, Arbon, (www.fpt-motorenforschung.ch)
- [12] Wärtsilä (Schweiz) AG (www.wartsila.com/en_CH)
- [13] ABB Turbo Systems AG, Baden (www.abb.ch/turbocharging)
- [14] PSI Paul Scherrer Institut, Villigen (www.psi.ch)
- [15] Empa, Abteilung Verbrennungsmotoren (www.empa.ch)
- [16] Wenko AG Swissauto, Burgdorf (www.swissauto.com/)
- [17] Bucher AG Langenthal Motorex (www.motorex.ch)
- [18] Kistler Instrumente AG, Winterthur, (www.kistler.com)
- [19] SLSI VUV Beamline Swiss-Light-Source beamline for Vacuum Ultraviolet Radiation, PSI
- [20] COST European Cooperation in Science and Technology Action CM 901 Detailed Chemical Kinetic Models for Cleaner Combustion (www.ensic.inpl-nancy.fr/cost/)
- [21] Clean Efficient Large Diesel Engine (CELaDE) (www.ccem.ch)
- [22] SwisselectricResearch (www.swisselectric-research.ch)
- [23] NCCR-MUST: Molecular Ultrafast Science and Technology, (www.nccr-must.ch/home.html)
- [24] IEA Working Party on Fossil Fuels (IEA-WPPF) (www.iea.org)
- [25] IEA IA Advanced Motor Fuels (www.iea-amf.org)

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- ERWEITERUNG UND VALIDIERUNG DER CRFD-SIMULATION FÜR NEUE MOTORISCHE BRENNVERFAHREN UND KRAFTSTOFFE** R&D 2.1.4*

Lead: ETHZ-LAV	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period: 2008–2012

Abstract: Erweiterung von Simulationswerkzeugen und experimentellen Validierung für neue Kraftstoffe und entsprechend ausgelegte Brennverfahren. Motorischen Experimente werden an einem neuen Versuchsträger zur Validierung der Simulation für grössere Dieselmotoren durchgeführt. Optische Experimente an Modellbrennkammern liefern zusätzlich Daten zum grundlegenden Verständnis des Zünd-, Verbrennungs- und Emissionsverhaltens neuer, synthetische Kraftstoffe.
- ENTWICKLUNG SCHNELLER MESS- UND RECHENVERFAHREN FÜR ENERGIEEFFIZIENTE DIESELBRENNVERFAHREN** R&D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period: 2008–2012

Abstract: Entwicklung schneller messtechnischer und Modellierungsmethoden zur Optimierung des Zusammenspiels zwischen motorischem Brennverfahren und Abgasnachbehandlung, insbesondere der SCR-basierten Entstickung von „medium“- und „heavy-duty“ Dieselmotoren. Ziel ist die Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften (z. B. EURO 6) möglichst mit einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads (CO₂-Reduktion).
- ENTWICKLUNG SCHNELLER MESS- UND RECHENVERFAHREN FÜR ENERGIEEFFIZIENTE DIESELBRENNVERFAHREN** R&D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period: 2008–2012

Abstract: Entwicklung schneller messtechnischer und Modellierungsmethoden zur Optimierung des Zusammenspiels zwischen motorischem Brennverfahren und Abgasnachbehandlung, insbesondere der SCR-basierten Entstickung von „medium“- und „heavy-duty“ Dieselmotoren. Ziel ist die Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften (z. B. EURO 6) möglichst mit einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads (CO₂-Reduktion).
- INFLUENCES OF BIOCOMPONENTS (FAME) ON EMISSIONS AND ON EXHAUST SYSTEMS OF HD-DIESEL ENGINES (BIOEXDI)** R&D 2.1.4

Lead: BFH TI - AFHB	Funding: BFE
Contact: Czerwinski Jan Jan.Czerwinski@bfh.ch	Period: 2009–2012

Abstract: Untersuchung der Auswirkungen von Kraftstoffen mit zugemischten Biokomponenten (RME) auf die Abgasnachbehandlungssysteme von Dieselmotoren. Versuche und Messungen mit B0, B7, B20, B30, B100 mit/ ohne Katalysator (SCR) und Dieselpartikelfilter (DPF). Untersuchung der Regenerationsvorgänge und Ablagerungen im DPF.
- WEITERENTWICKLUNG EINES REFERENZEXPERIMENTS ("SPRAY COMBUSTION CHAMBER") IN BEZUG AUF DIE OPTIMIERUNG DES VERBRENNUNGSSY (HERCULES)** R&D 2.1.4

Lead: Wärtsilä Schweiz AG	Funding: BFE
Contact: Herrmann Kai kai.herrmann@wartsila.com	Period: 2009–2012

Abstract: Weiterentwicklung eines neuartigen Versuchsträgers mit optischer Zugänglichkeit, der die Brennkammer eines grossen Zweitakt-Schiffsdieselmotors nachbildet und die Untersuchung innermotorischer Vorgänge unter typischen Bedingungen ermöglicht. Verbessern des Verständnisses von verbrennungsrelevanten Prozessen für die Validierung und weitere Entwicklung von Simulationsmodellen.
- MODELING OF ENERGY CONVERSION PROCESSES AT THE MICROSACLE** R&D 2.1.4

Lead: PSI-Combustion	Funding: BFE
Contact: Mantzaras Ioannis ioannis.mantzaras@psi.ch	Period: 2009–2012

Abstract: Entwicklung numerischer Modelle zur Darstellung der wichtigsten Prozesse von thermochemischer und elektrochemischer Energieumwandlung in Mikrokanälen. Entwicklung neuer Lattice Boltzmann Modelle für Multispezies, nicht isotherme, reaktive und komplexe dreidimensionale Mikroströmungen. Das resultierende Berechnungsmodell wird auch für die Simulation von chemisch reaktiven Strömungen genutzt werden können.
- AUSLEGUNG UND REALISIERUNG VON WKK-ANLAGEN MIT „NULL“- SCHADSTOFF-POTENZIAL UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG BIOGENER ENERGietRÄGER** R&D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period: 2011–2013

Abstract: Klein-WKK-Anlage (≤ 10 kWel.) mit el. Wirkungsgrad 35 % und „Null“-Schadstoff-Potenzial mit Erdgas. Erweiterung auf Biogase geplant. Für die optimale Auslegung des 1 Zylindermotors werden reaktionskinetische und strömungstechnische Grundlagen, insbesondere für den Einsatz gekühlter Abgasrückführung, erarbeitet. Nutzung dieser Grundlagen für Gasmotoren auch im Rahmen eines Projekts mit der FVV.

● **MOLECULAR DATA OF COMBUSTION RELEVANT RADICALS** R&D 2.1.4

Lead:	PSI-Combustion	Funding:	BFE
Contact:	Thomas Gerber thomas.gerber@psi.ch	Period:	2011–2014

Abstract: Der Zündvorgang hat einen grundlegenden Einfluss auf den Verlauf der Verbrennung und damit die Entwicklung von Schadstoffen, insbesondere von Russ. Die thermochemischen Daten der Radikale im Zündprozess sollen mit spektroskopischen Messungen im ns - μ s-Bereich genauer als bisher bestimmt werden. Problematisch ist die Erzeugung der Radikale. Zusammenarbeit mit EU-COST-Action 901 und NCCR-MUST.

● **CHARAKTERISIERUNG VON HOCHSIEDENDEN/TEILSYNTHETISCHEN KRAFTSTOFFEN FÜR HOMOGENE UND TEILHOMOGENE DIESELVERBRENNUNG** R&D 2.1.4

Lead:	ETHZ-LAV	Funding:	BFE
Contact:	Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period:	2012–2016

Abstract: Experimentelle Charakterisierung teilsynthetischer hochsiedender Kraftstoffe und Entwicklung korrespondierender Reaktionsmodelle für die vollständig homogene selbstzündende Verbrennung (HCCI). Untersuchung der Übertragbarkeit für teilhomogene Verfahren. Erarbeitung einer Kennzahl, welche die Zündwilligkeit der untersuchten Kraftstoffe zuverlässig charakterisiert und die motorische Brennverfahrensentwicklung massgeblich unterstützt.

● **3D-CRFD MODELLE FÜR CO₂- UND EMISSIONSARME MOTORISCHE BRENNVERFAHREN BEI DER DIFFUSIONSGESTEUERTEN VERBRENNUNG BIOGENER/SYNTHETISCHER KRAFTSTOFFE** R&D 2.1.4

Lead:	combustion and flow solutions GmbH	Funding:	BFE
Contact:	Christian Lämmle laemml@combustion.flow-solutions.com	Period:	2012–2016

Abstract: Weiterentwicklung eines 3D-CRFD-Modells hinsichtlich Auslegung von CO₂- und emissionsarmen motorischen Brennverfahren bei der diffusionsgesteuerten Verbrennung. Fokus der Erweiterungen sind Dieselsurrogate und biogene sowie synthetische Kraftstoffe unter Verwendung detaillierter Reaktionskinetiken, um quantitative Vorhersagen von motorisch relevanten Parametern zu ermöglichen

● **«GASPOT» POTENZIALE VON BRENNVERFAHREN IN GASMOTOREN FÜR UNTERSCHIEDLICHE GASQUALITÄTEN, DETEKTION VON GASPARAMETERN MITTELS NEUARTIGER SENSORIK** R&D 2.1.4

Lead:	Empa	Funding:	BFE
Contact:	Patric Soltic patric.soltic@empa.ch	Period:	2012–2014

Abstract: Erd- und Biogas kann örtlich und zeitlich grosse Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung aufweisen. Dies führt zu Problemen bzw. zu ungenutzten Potenzialen in der verbrennungsmotorischen Nutzung in WKK Anlagen, Nutzfahrzeug-, PW- und Schiffsantrieben. Es soll erforscht werden, wie die dem Motor zugeführte Gasqualität mittels eines Sensors quantifiziert und damit das Brennverfahren adaptiert bzw. weiterentwickelt werden kann.

● **XHOST HARVESTER - EINFACHE UND WIRKUNGSVOLLE EFFIZIENZSTEIGERUNG FÜR STATIONÄRE ANTRIEBE** R&D 2.1.4

Lead:	Oekozentrum	Funding:	BFE
Contact:	Martin Schmid martin.schmid@oekozentrum.ch	Period:	2012–2013

Abstract: Xhost Harvester erzeugt aus der Auspuffabhitze eines Antriebes einen Unterdruck, der via Turbolader die Leistung und die Effizienz des Antriebes steigern kann. Feldversuche zeigten bei bis zu 11 % Mehrleistung eine Senkung des spez. Verbrauches von 1,3 % bis 7 %. Simulationen und Prüfstandsversuche sollen belastbare Aussagen und Zahlen, sowie wissenschaftliche Erklärungen für diese Effizienzsteigerungsmaßnahme liefern.

