



Februar 2010

Forschungsprogramm Verbrennung

Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Autor:

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

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

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Ein grosser Teil der für unsere Energieversorgung genutzten Energieträger wie Erdöl, Erdgas oder Kohle wird durch Verbrennung in die nutzbaren Energieformen Kraft (Strom) und Wärme umgewandelt. Die Endlichkeit der vorgenannten Rohstoffe fossilen Ursprungs, aber auch die durch die Verbrennung entstehenden Schadstoffe wie Russ, Feinstaub, Stickoxid oder Kohlenwasserstoffe stellen hohe Anforderungen an die Entwicklung effizienter und schadstoffarmer Verbrennungssysteme. Die Nutzung fossiler Energieträger bewirkt zudem einen Zuwachs von Kohlendioxid in der Atmosphäre und damit eine Verstärkung des Treibhauseffekts. Neben der Optimierung der Verbrennungssysteme für konventionelle Brennstoffe erhält deshalb die Nutzung von Holz, Biogas, Ethanol oder Biodiesel, die aus nachwachsenden Energieträgern hergestellt werden, eine zunehmende Bedeutung in der Verbrennungsforschung. Verschiedene Forschungsarbeiten beinhalten folglich neben den grundlegenden Aspekten zur Optimierung von Verbrennungssystemen einen speziellen Fokus zur Nutzung erneuerbarer Energieträger.

In der Schweiz sind mehrere Entwicklungszentren von weltweit tätigen Herstellern von Grossdieselmotoren, Dieselmotoren für Nutzfahrzeuge und Baumaschinen sowie Gasturbinen domiziliert. Verschiedene Hochschulen und Forschungsinstitutionen arbeiten eng mit der Industrie zusammen und sind international anerkannt. Zum Gesamtumsatz der Schweizer Verbrennungsindustrie von rund CHF 2 Mrd. tragen auch diverse Entwickler und Hersteller von kleineren Verbrennungssystemen und Zulieferer bei. Der Bund setzt für die Verbrennungsforschung jährlich rund CHF 11,5 Mio. ein.

Zielsetzungen

Die Zielsetzungen des Programms Verbrennung richten sich nach den Vorgaben des Konzepts der Energieforschung des Bundes [1] für die Periode 2008 – 2011:

Verbesserte Forschungsmethoden und -instrumente

Die Instrumente der Forschung wie physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger sind weiter zu entwickeln und an die gestellten Anforderungen anzupassen.

Erhöhung des Systemwirkungsgrads

Mit der Erhöhung des Wirkungsgrads werden der Brennstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen reduziert. Wichtig ist der Einbezug des Gesamtsystems und der unterschiedlichen Lastzustände.

Reduktion der Schadstoffemissionen

International werden die Emissionsvorschriften für Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxide sowie Russ und Feinstaub weiter verschärft. Zudem wird die Verminderung der Kohlendioxide gefordert.

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.

Daraus werden für die Periode 2008 – 2011 die folgenden 6 Schwerpunkte abgeleitet:

- 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», umfassend die Prozesskette Gemischbildung–Zündung–Verbrennung–Abgasnachbehandlung.
- Darstellung von «Null-Emission-Systemen» für die kleinskalige (10 kW bis 100 kW) kombinierte Strom-Wärme-Kälte-Erzeugung (inkl. Wärmepumpen und Biomasse) und für PW-Antriebe.
- Optimierung von Gemischaufbereitung, Verbrennung und Abgasnachbehandlung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim (Teil-)Einsatz von biogenen Kraftstoffen.
- Optimierung von Gemischaufbereitung und Verbrennung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim Einsatz von konventionellen und biogenen Kraftstoffen in der atmosphärischen Verbrennung im kleinskaligen Bereich
- Stärkere Vernetzung und Auftritt der Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung und -industrie inkl. Leistungserbringern von Komponenten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

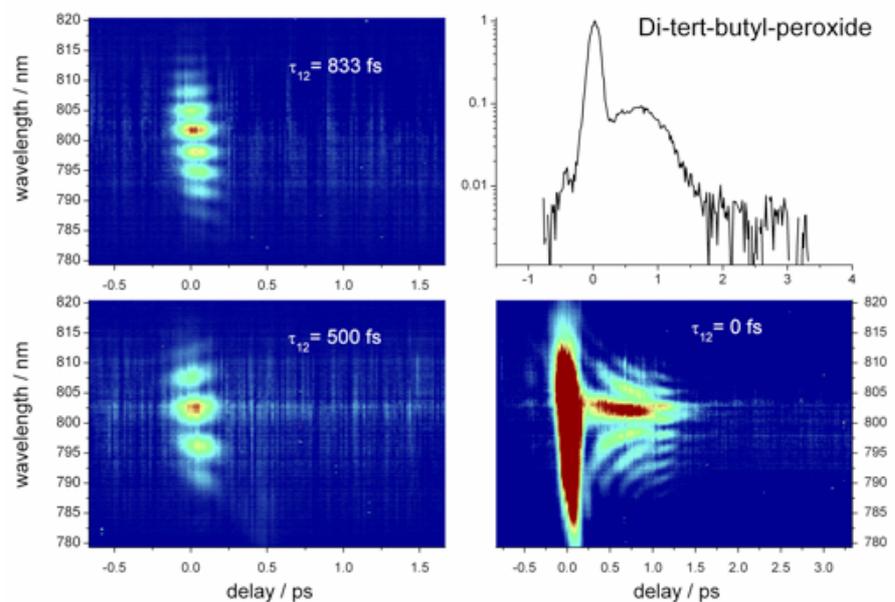
Verbesserung der Forschungsgrundlagen und -methoden

(Physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger)

Um die auf hohem technischem Niveau stehenden Verbrennungssysteme entsprechend den gestellten Forderungen nach höherem Wirkungsgrad, Variabilität der Brennstoffe und Reduktion der Schadstoffe zu verbessern, ist ein fundiertes Wissen über die Vorgänge im Verbrennungsprozess notwendig. Rein empirische Vorgehensweisen genügen nicht mehr, um die unterschiedlichen Funktionsweisen und Einflussfaktoren der chemischen, thermodynamischen und kinetischen Prozesse in der Verbrennung zu verstehen und entsprechende Veränderungen zu bestimmen. Notwendig sind Daten der chemischen Prozesse, numerische Modelle zur Simulation der Vorgänge in der Verbrennung sowie Messmethoden und spezielle Versuchsträger. Damit können die theoretischen Modelle überprüft und verbesserte Komponenten getestet werden. Hinzu kommen grössere Versuchsstände, an denen die Interaktionen der verschiedenen Teilsysteme wie die Einspritzung, der Zündvorgang, der Verbrennungsablauf und die Abgasnachbehandlung eines Verbrennungsmotors untersucht werden können. In verschiedenen vom Bundesamt für Energie (BFE) unterstützten Projekten werden deshalb Verbesserungen der physikalischen und chemischen Grundlagen, der Rechenmodelle, der Messmethoden und der Versuchsträger weiterentwickelt. Diese haben auch immer einen Bezug zu den wirkungsorientierten Zielen der Verbrennungsforschung: Erhöhung des Systemwirkungsgrads, Reduktion der Schadstoffemissionen sowie Nutzung verschiedener Energieträger.

Thermochemische Daten von Radikalen im Zündvorgang

Der Zündvorgang hat einen grundlegenden Einfluss auf den Verlauf der Verbrennung und damit auf 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.

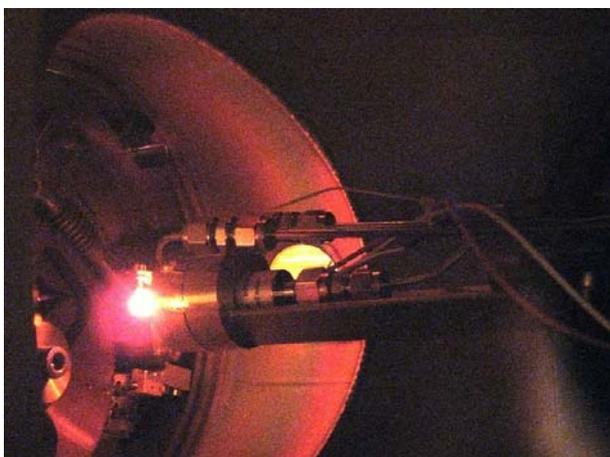
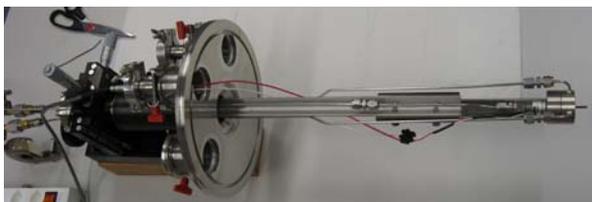


Figur 1: Spektren von di-tert-Butyl-Peroxid, aufgenommen bei drei verschiedenen Zeiten

Die thermochemischen Daten von Radikalen, die bisher grösstenteils aus kinetischen Versuchen gewonnenen wurden, erreichen eine zu geringe «chemische» Genauigkeit von bestenfalls 2 kJ/mol, typisch sind 10 kJ/mol. Diese Ungenauigkeit schlägt sich in den Reaktionsgeschwindigkeiten nieder, die auch bei einer Temperatur von 1000 °C nur eine Genauigkeit innerhalb eines Faktors 10 erreicht. Damit ist beispielsweise die Produktion von Stickoxid kaum verlässlich modellierbar. Kinetische Messungen allein genügen deshalb nicht, um die erforderliche Genauigkeit der Daten zu erreichen. Vielmehr muss die zu ihrer Bildung aufgewendete Energie und ihre interne Energie während einer kurzen Lebensdauer im Bereich von ns bis μ s bestimmt werden. Dazu eignen sich nur spektroskopische Methoden in Kombination mit

Massenspektrometrie, welche die notwendige Zeitauflösung erbringen und die empfindlich genug sind, um die nur in kleinen Quantitäten herstellbaren Radikale zu detektieren.

Im Ende 2009 abgeschlossenen Projekt *Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion* [2] der Gruppe «Molekulare Dynamik» des Paul Scherrer Instituts (PSI) wurden die notwendigen spektroskopischen und massenspektrometrischen Instrumente entwickelt und installiert. Mit frequenz aufgelöster Mehrfarbenspektroskopie wurde das C_2^- und das C_2^- -Anion vermessen. Der Einfluss nahe beieinander liegender elektronischer Zustände auf die Vibrations- und Rotationsenergie konnten eindeutig zugeordnet werden. Zudem wurde gezeigt, dass die angewandten nicht linearen Messmethoden auf extreme Empfindlichkeit ausgerichtet und sehr kleine Probemengen (10 Millionen Moleküle) vermessen werden können. Die Messungen an Tert-Butyl-Peroxy mit Femtosekunden-Pump-Probe-Methoden wurden erweitert und vertieft. Durch die spektrale Zerlegung der gemessenen Signale erschliesst sich eine zusätzliche Dimension, die wesentlich mehr Information bereitstellt, als das Zeitspektrum des üblichen Pump-Probe-Verfahrens (Fig. 1). Allerdings ist die Auswertung der mehrdimensionalen Spektren sehr aufwändig und deren eindeutige Interpretation Gegenstand zukünftiger Arbeiten.



Figur 2: Pyrolytische Radikale-Quelle. Oben: Das dünne Röhrchen mit 1 mm Durchmesser kann auf 2'600 K erhitzt werden. Unten: Die Radikale-Quelle in Funktion im Vakuum.

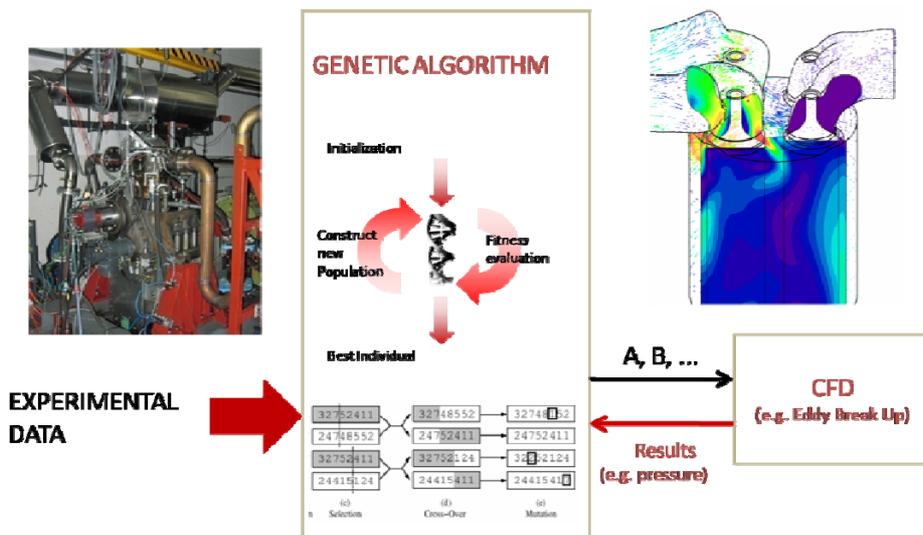
Neben dem Laserlabor steht auch eine Strahllinie an der Swiss-Light-Source [3] zur Verfügung mit der dank Spektroskopie im Vakuum-Ultraviolett-Bereich die Enthalpien von Ionenfragmenten und damit auch die Enthalpien der entsprechenden neutralen Radikale sehr direkt bestimmt werden können (Fig. 2). In Zusammenarbeit mit externen Gruppen konnte so die Enthalpie von Tert-Butyl-Peroxy, für die es bisher keine experimentell begründete Herleitung gab, genauer festgelegt werden. Dank einer gegenüber Standardexperimenten zehnfach verbesserten Genauigkeit konnte auch der Dissoziationsmechanismus von Methan-Ionen genau vermessen werden. Die adiabatische Ionisationsenergie von Phenylpropargyl-Radikale wurde gemessen. Die Kenntnis der unterschiedlichen Ionisationsenergien der Phenylpropargyl-Ionen erlaubte in einem ionensensitiven Experiment, die einzelnen Isomere in einer Flamme zu unterscheiden.

Das Projekt konnte erfolgreich in die per 2010 startende europäische COST Forschungsaktion CM0901 [4] mit dem Titel «Detailed Chemical Kinetic Models for Cleaner Combustion» eingebracht werden. COST koordinierte in Europa die Zusammenarbeit in Forschung und Entwicklung im Auftrag der angeschlossenen Mitgliedstaaten. Zur vorliegenden Aktion CM0901 sagten bisher Gruppen aus 18 Staaten ihre Mitarbeit zu. Das Ziel dieses grossen Verbandes ist, ein Verbrennungsmodell zu erstellen, das insbesondere auch für die Beschreibung von Verbrennungsreaktionen von aus erneuerbaren Quellen gewonnenen Brennstoffe verwendet werden kann.

Numerische Simulationsmethoden

Die Verbesserung von Verbrennungssystemen erfolgt in der Industrie in erster Linie über numerische Modelle, die mit Hochleistungscomputern berechnet und visualisiert werden. Damit werden aufwändige Messreihen und Versuchsanstaltungen durch kostengünstige und Zeit sparende Simulationsberechnungen ersetzt. Mit den sich ändernden Anforderungen an Verbrennungsmotoren müssen auch die Rechen-Codes weiterentwickelt werden. Am Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) bestehen langjährige Erfahrungen in der Entwicklung der Computational Reactive Fluid Dynamics (CRFD). Im Projekt *Erweiterung und Validierung der CRFD-*

Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe [5] werden die bestehenden Simulationswerkzeuge erweitert, um neuartigen Brennverfahren und unterschiedlichen Kraftstoffeigenschaften Rechnung tragen zu können und präzise Vorhersagen über den Verbrennungsprozess – namentlich die Emissionen und die Wärmefreisetzung – zu ermöglichen. Die Problematik wird dabei von zwei Seiten angegangen: In einem experimenteller Teil zur Bereitstellung der Validierungsdaten und parallel dazu in einem theoretischen Teil zur Entwicklung der Simulations-Codes (Fig. 3).



Figur 3: Schematische Darstellung der Vorgehensweise

Zu diesem Zweck werden vier Arbeitspakete (AP) bearbeitet: Seitens der Messung kommen ein «MTU 396»-1-Zylinder-Heavy-Duty-Forschungsmotor mit umfangreicher Instrumentierung (inkl. Endoskop und der Gasentnahme im Zylinder) zum Einsatz (AP1). In Ergänzung dazu werden an generischen Versuchsträgern (Einhubtriebwerk) mit optischem Zugang mittels Hochgeschwindigkeitskameras bildgebende Verfahren für Diesel (AP2a) und Gas (AP2b) appliziert. Diese Daten werden anschliessend verwendet, um Modellentwicklung seitens des Conditional-Moment-Closure-Verbrennungscodes (CMC) weiter voranzutreiben und zu validieren (AP3 für den MTU-Motor, AP4a für das Einhubtriebwerk mit Diesel und AP4b für Gas). 2009 wurden folgende Fortschritte erzielt:

AP1: Bisher konzentrierten sich die Arbeiten auf die Vorbereitung des 1-Zylindermotors für die Durchführung der diversen Messekampagnen. Ein sehr flexibles Common-Rail-Einspritzsystem wurde in Betrieb genommen und erfolgreich getestet.

Luftseitig wurden letzte Anpassungen vorgenommen – u.a. ein gekühlter Abgas-Rezirkulations-Pfad (AGR). Zudem mussten diverse technische Probleme wie beispielsweise die Regelung der Bremse oder starke Vibrationen im Kurbeltrieb gelöst werden.

AP2a: Eine Diesel-Einspritzdüse wurde hinsichtlich hydraulischem Verzug und Reproduzierbarkeit der Einspritzung charakterisiert. Eine neue Hochgeschwindigkeitskamera wurde erfolgreich in Betrieb genommen; erste optische Untersuchungen zeigten hohe Fluktuationen in der Reproduzierbarkeit

des Zündortes. Erste Vergleiche von Einspritzcharakteristiken der verschiedenen synthetischen Kraftstoffe wurden durchgeführt.

AP3: Eine zusätzliche Modellvalidierung mittels Daten eines «In-House»

Heavy-Duty-Motors konnten in der Zeitschrift der Society of Automotive Engineers (SAE) publiziert und am SAE World Congress präsentiert werden. Eine Sensitivitätsstudie an der Hochtemperatur-Druck-Zelle (HTDZ) zur Validierung von Zündort, Zündzeitpunkt und den Einflüssen verschiedener Modellunsicherheiten wurde durchgeführt (siehe Titelbild).

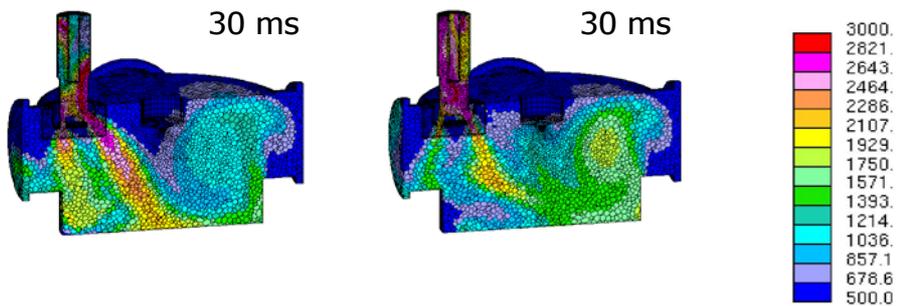
Für den MTU-Motor konnten verschiedene numerische Setups erfolgreich generiert und Spray- und Verbrennungssimulationen durchgeführt werden. Zur schnellen Abstimmung der Modellparameter wurde ein auf generischen Algorithmen basierender, an den CFD-Solver gekoppelter Code entwickelt.

AP4a: Das Design der Vorbrennkammer für die HTDZ wurde numerisch ausgelegt. Verschiedene Komponenten wurden bereits gefertigt und werden demnächst assembliert und getestet. Zur schnellen Abschätzung der Betriebsparameter und den daraus resultierenden Zuständen in der Kammer wurde eine spezielle Software entwickelt. (Fig. 4)

AP4b and AP2b: Die Literaturstudie zur turbulenten Flammgeschwindigkeits-Korrelation wurde abgeschlossen und ein passendes Modell identifiziert. Für das Einhubtriebwerk wurden Spray-Si-

mulationen mit verschiedenen Brennstoffen durchgeführt. Zusammen mit ersten Rechnungen zur Abschätzung des Einflusses der Methan-Grundladung liefern diese Vorarbeiten wertvollen Input bezüglich Betriebs- und Randbedingungen für die bevorstehenden Experimente.

Im 2007 abgeschlossenen Projekt *Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Mikrobereich* [6] wurde an der ETHZ eine neue Annäherung für die rechenunterstützte Strömungsdynamik an einer Mikrometerskala entwickelt. Diese Grundlagen werden im 2009 gestarteten Projekt *Modeling of Energy Conversion Process at Microscale with Application to PEFCs* [7] am PSI nun weiter erforscht. Im Fokus stehen reaktive Strömungen in komplexen Mikrokanälen wie sie in Katalysatoren für die Brennstoffaufbereitung und in Brennstoffzellen vorkommen. Das Projekt wird zusammen mit dem Forschungsprogramm Brennstoffzellen gefördert.



Figur 4: Simulation verschiedener Einspritzdüsen in der HTDZ

Erhöhung des Systemwirkungsgrads und Reduktion der Schadstoffemissionen

Massnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrads der Verbrennung erfordern in der Regel höhere Temperaturen und höhere Drücke. Dadurch wird jedoch die Bildung von Schadstoffen wie Stickoxid verstärkt. Ganzheitliche Betrachtungen, welche die gegenteiligen Auswirkungen einzelner Massnahmen auf den Wirkungsgrad und die Schadstoffbildung berücksichtigen, sind erforderlich. Hinzu kommen die peripheren Komponenten der Verbrennung, wie Brennstoffzusammensetzung, Gemischbildung, Abgasrückführung oder Abgasbehandlung mit denen Nachteile des Verbrennungsprozesses wieder korrigiert werden können. Ein Beispiel ist die Abgasnachbehandlung, um die Stickoxid-Werte zu reduzieren.

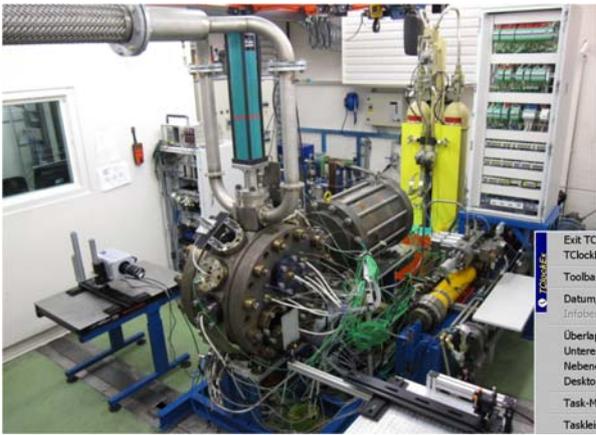
Grossvolumige Dieselmotoren

Im EU-Projekt *HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships)* [8] werden neue Technologien für die Reduktion der Schadstoffemissionen und die Erhöhung des Wirkungsgrads grosser Schiffsdieselmotoren entwickelt. Die Schweizer Projektteilnehmer Wärsilä Schweiz AG, ABB Turbosystems AG, das LAV der ETHZ, das PSI und die Empa befassen sich in einem Teilprojekt mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für deren Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Das BFE unterstützte in einem 2008 abgeschlossenen Projekt die Entwicklung eines experimentellen Versuchsträgers, der das Verbrennungssystem grosser 2-Takt-Schiffsdieselmotoren (Bohrung 500 mm) unter Berücksichtigung der charakteristischen Bedingungen weitestgehend repräsentiert. Im zwischenzeitlich gestarteten EU-Nachfolgeprojekt

HERCULES Beta [9] werden damit die benötigten Referenzdaten generiert. Parallel dazu unterstützt das BFE einen eigenständigen Projektteil *Weiterentwicklung eines Referenzexperiments (Spray Combustion Chamber) in Bezug auf die Optimierung des Verbrennungssystems von Grossdieselmotoren* [10], in dem erweiterte Aspekte untersucht und die Brennkammer weiterentwickelt werden sollen. Dazu gehört die Untersuchung des Zündverhaltens verschiedener auch alternativer Brennstoffe (von Schweröl bis handelsüblichem Dieseldieselmotorenkraftstoff), Ergänzung der Anlage durch neuartige Komponenten wie Probeentnahmesonden oder Schaugläser und die entwicklungstechnische Verbesserung von Bauteilen wie die Einspritzdüsen, die später in die eigentliche Produktentwicklung fliessen. Hinzu kommen die Anwendung und die Weiterentwicklung von Diagonseverfahren wie etwa optische Messtechniken.

2009 konnte der Aufbau des Versuchstandes fertig gestellt (Fig. 5), die Inbetriebnahme abgeschlossen und erste reguläre Messkampagnen durchgeführt werden. Die realen Motoren entsprechenden thermo- und fluid-dynamischen Bedingungen bei Einspritzbeginn in der Kammer werden über die Prozessgaszuführung durch schräge Einlasskanäle

le aus einem Druckkessel/Wärmeregenerations-System gewährleistet.



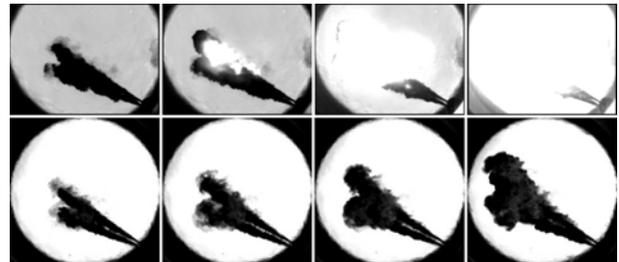
Figur 5: Experimenteller Versuchstand «Spray Combustion Chamber»

Die Validierung dieser simultanen Anforderungen in Bezug auf Druck- und Temperaturniveaus sowie hinsichtlich des Bereiches der erforderlichen Drallströmung wurde erfolgreich durchgeführt. Ferner konnte das Einspritzsystem in Bezug auf möglichst reale Druckverläufe wesentlich verbessert werden. Zudem wurde das Messdatenerfassungssystem erweitert, um das «Kennfeld» sowie alle weiteren wichtigen Randbedingungen zu erfassen. Im Weiteren konnte die Schattenbildtechnik durch den Einsatz einer Laserdiode wesentlich optimiert werden, so dass die Einspritzstrahlausbreitung selbst nach der Zündung durch entsprechende Filterung des Flammenleuchtens nach wie vor erfasst werden kann (Fig. 6). Schliesslich konnte ein erstes Set von Referenzdaten bei unterschiedlichen Einspritzkonfigurationen (Geometrie der Düse, Anzahl Bohrungen) und Betriebsparametern (Druck, Temperatur, Einspritzdruck) generiert werden. Die bis jetzt durchgeführten ersten Untersuchungen bestätigen das Potenzial der Anlage in Bezug auf ein verbessertes Verständnis von verbrennungsrelevanten Prozessen unter realistischen schiffsdieselmotorischen Bedingungen.

Optimierung von Brennverfahren und Abgasnachbehandlung

Die weitere Entwicklung von «Medium-» und «Heavy-Duty»-Dieselmotoren (Busse, Lastwagen, Baumaschinen usw.) wird einerseits von der Forderung nach Reduktion des spezifischen CO₂-Ausstosses (und somit der Erhöhung des thermodynamischen Wirkungsgrades) und andererseits von der Notwendigkeit, mittelfristig nochmals schärfere

Emissionsvorschriften wie EURO 6 (gegen 2013) und die USA-2014-Gesetzgebung zu erfüllen, bestimmt. So müssen beispielsweise die NO_x-Emissionen von aktuell zulässigen 2,0 g/kWh auf 0,4 g/kWh – also um den Faktor 5 – gesenkt werden. Eine wesentliche Voraussetzung für das Gelingen der industriellen Forschung und Entwicklung ist die Verfügbarkeit von «on-line» Messtechniken und entsprechend schneller Modelle für den Arbeitsprozess und die wichtigsten Schadstoffemissionen des Motors, d.h. Stickoxide und Russ. Diese Forderung, die Funktionsweise und die Einflussfaktoren des gesamten Verbrennungssystems – d.h. von der Brennstoffaufbereitung bis zur Abgasnachbehandlung – in die Betrachtungen mit einzubeziehen, wird im Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselmotoren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung* des LAV der ETHZ [11] erfüllt. Projektgegenstand ist die Entwicklung von sehr schnellen messtechnischen und Modellierungsmethoden für die Optimierung des Zusammenspiels zwischen motorischem Brennverfahren und Abgasnachbehandlung, insbesondere der SCR-basierten Entstickung. Die zu entwickelnden Werkzeuge werden an einem eigens dazu aufzubauenden, leistungsstarken, transient-fahrbaren Prüfstand evaluiert und kontinuierlich verbessert.



Figur 6: Schattenbildtechnik-Messungen der Einspritzstrahlausbreitung basierend auf einer regulären (Lichtbogen-)Lichtquelle (obere Sequenz) gegenüber dem Einsatz einer pulsierenden Laserdiode (Filter) als verbesserte Lichtquelle (untere Sequenz)

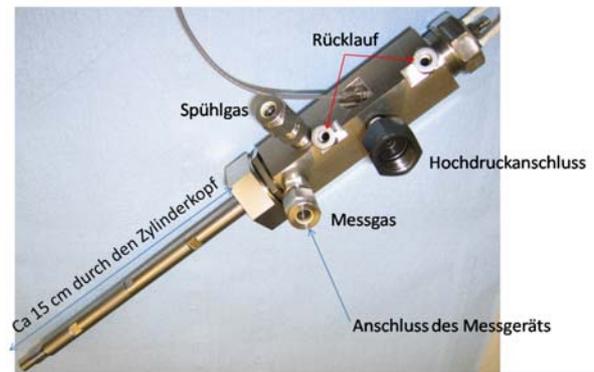
Um die Anforderungen an ein Abgasnachbehandlungssystem von Dieselmotoren zu definieren, ist eine genaue Kenntnis der Emissionen (Russ und NO_x) des Motors erforderlich. In früheren Projekten konnten mittels eines im Rahmen eines KTI-Projekts [12] entwickelten, miniaturisierten In-Zylinder-Pyrometers vertiefte Kenntnisse der Bildung von Russ im Zylinder unter stationären Bedingungen gewonnen werden. Diese Prozesse sind, wegen der wesentlich erhöhten Anforderungen an die

Messtechnik, unter Lasttransienten noch nicht ausreichend verstanden. Da gerade solche Transienten einen ganz wesentlichen Beitrag an die Russmissionen liefern, sind vertiefte Untersuchungen dieser Prozesse in Hinblick auf die Erfüllung kommender Abgasgrenzwerte unbedingt erforderlich. Im Berichtsjahr wurde ein 4-Zylinder «Heavy-Duty»-Dieselmotor von Liebherr zusammen mit einer Leistungsbremse sowie einem Steuer- und Überwachungssystem und der erforderlichen Messtechnik aufgebaut (Fig. 7). Parallel dazu wurde am LAV im Rahmen des BFE-Projekts *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* ein 1-Zylinder-Dieselmotor von MTU aufgebaut und in Betrieb gesetzt. Mit diesem ausgesprochenen Forschungsmotor werden erste Versuche mit dem schnellen Gasentnahme-Ventil durchgeführt werden. Das schnelle Ventil (Fig. 8) wurde im Rahmen des 2007 abgeschlossenen BFE Projekts *Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren – Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss* [13] entwickelt. Es wurde nun an einem mit einer definierten Gasmischung gefüllten Druckbehälter getestet und charakterisiert. Dabei wurde die aus dem Druckbehälter entnommene Probe mittels eines schnellen Massenspektrometers (Airsense) analysiert. Das Zeit-Verhalten dieses Systems wurde charakterisiert und erkannte Verbesserungsmöglichkeiten wurden umgesetzt. Im Weiteren wurde das Pyrometer erstmals an Lasttransienten zur Untersuchung der Russbildung im Zylinder eingesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass die pyrometrische Messung einerseits zuverlässig mit der im Auspuff gemessenen Russmission korreliert und andererseits Zeit-aufgelöst die Russbildung und -oxidation in jedem einzelnen Verbrennungszyklus charakterisiert werden kann. Ein im Rahmen des Projekts *Russgeregelter Dieselmotor* der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [14] zur Verfügung gestellter 6-Zylindermotor wurde erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Nach aufwendigen Anpassungen des Betriebskennfelds konnten erste Serienmessungen gewonnen, ausgewertet und für die Parametrierung phänomenologischer Modelle verwendet werden. Zur Simulation eines SCR-deNO_x-Katalysators wurde für die dem Katalysator vorgelagerten Verdampfungs- und Harnstoff-Hydrolyse-Prozesse verschiedene Modelle getestet und geeignete selektiert. Für die Simulation der

Einzelkanäle wurde ein Simulations-Code entwickelt, welcher eine effiziente Parametrierung mittels Algorithmen anhand der verfügbaren experimentellen Daten ermöglicht.



Figur 7: Aufbau des Versuchsstands mit einem Liebherr 4-Zylindermotor D 924



Figur 8: Schnelle Gas-Entnahmesonde entwickelt von der ETHZ in Zusammenarbeit mit der Firma Kistler

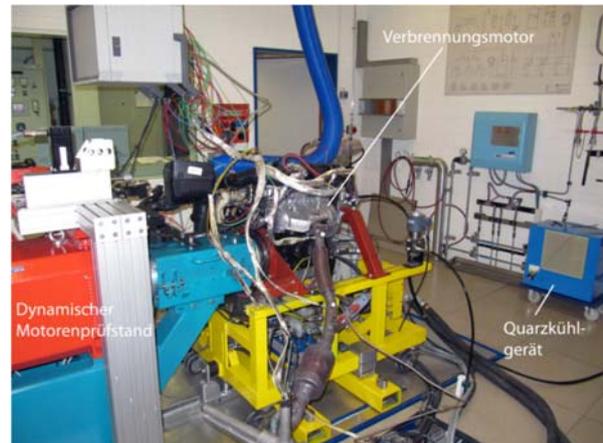
Katalytische Reaktionen im Brennraum

Im instationären Hochdruck-Verbrennungsprozess wie er im Verbrennungsmotor stattfindet, spielt der Wärmeverlust über die Zylinderwände, den Kolbenboden und den Zylinderkopf eine wichtige Rolle. Aus materialtechnischen Gründen ist die Wärmeabfuhr zur Vermeidung einer zu hohen Temperatur notwendig, und zudem bietet ein gekühlter Innenraum des Zylinders ein besseres Füllvermögen der angesaugten Luft bzw. des Gemisches. Der Wärmeverlust bewirkt jedoch auch eine Verminderung des Wirkungsgrades und die vergleichsweise kühlen Oberflächen führen zu einem Auslöschung der Flamme oder zum Kondensieren des Gemisches, was eine verstärkte Russbildung zur Folge hat. Abhilfe könnte eine Isolation der Flächen bewirken. Mit einer isolierenden Beschichtung des Kolbenbodens liesse sich auch eine katalytisch wirksame Schicht aufbringen. Damit könnten An-

teile des Brennstoffes und entstandene Schadstoffe bereits im Motor katalytisch umgewandelt und die Emissionen verbessert werden. Dies spielt u.a. bei mit Methan (Erdgas, Biogas) betriebenen Motoren eine wichtige Rolle. Die Emissionen von CH_4 beeinträchtigen den Katalysator und beinhalten ein grosses Treibhauspotenzial. Eine Umwandlung bereits im Brennraum bietet somit mehrere Vorteile.

Über die keramische Isolation von Kolben bei Dieselmotoren wurden bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Das Thema wird kontrovers dargestellt, wobei die Nachteile zu überwiegen scheinen. Bei vorgemischter ottomotorischer Verbrennung sind hingegen zum Thema Isolation und katalytische Beschichtung im Brennraum erst wenige Informationen vorhanden. Die Prozesse sind anders als beim Dieselmotor und hängen zudem stärker von den Eigenschaften des Kraftstoffes ab. Speziell der Einfluss auf die Flammlöschdistanz und die dadurch entstehende bessere Energieausnutzung sowie reduzierte Emissionen von Kohlenwasserstoffen sind bei Isolation und katalytischer Beschichtung unbekannt. Das Projekt *Insulated and Catalyst-Coated Pistons (INCA)* der Abteilung Verbrennungsmotoren der Empa [15] setzt sich zum Ziel, den Einfluss von isolierten und katalytisch beschichteten Kolben bei vorgemischter ottomotorischer Verbrennung systematisch experimentell zu untersuchen und zwar mit Benzin und Methan als Kraftstoff und mit verschiedenen Luft/Kraftstoff-Verhältnissen. Dazu wird ein 4-Zylinder-Ottomotor mit 2 Litern Hubraum und der Möglichkeit, Benzin oder Methan in das Saugrohr einzubringen, als Versuchsträger verwendet. Der Versuchsträger wird am Motorenprüfstand (Fig. 9) betrieben und ist mit Standardmesstechnik (Verbrauch, Temperaturen, Drücke, Schadstoffemissionen), sowie kurbelwinkelbasierter Aufzeichnung des Brennrauminnendruckes (Indizierung) mittels wassergekühlter piezoelektrischer Sensoren ausgerüstet. Mit Hilfe der Indizierung kann, unter Verwendung von Modellen, auf Verbrennung und thermodynamische Verluste geschlossen werden. Als erstes wurde der Motor für die Basisversuche mit Benzin und Methan und konventionellen Kolben in einem weiten Bereich von Luft/Kraftstoff-Verhältnissen bei verschiedenen Zündwinkeln betrieben. Anschliessend wird der Motor mit beschichteten Kolben (Fig. 10) ausgerüstet und die Versuche werden wiederholt. Ein systematischer

Vergleich der Energieumsetzung, der Verluste sowie der Schadstoffemissionen wird die Beurteilung des Potenziales dieser Massnahme für verschiedene Anwendungsfälle ($\lambda = 1$ sowie Magermotoren für Benzin und Methan) ermöglichen.



Figur 9: Versuchsträger am Motorenprüfstand



Figur 10: Originalkolben (links) und beschichteter Kolben (rechts)

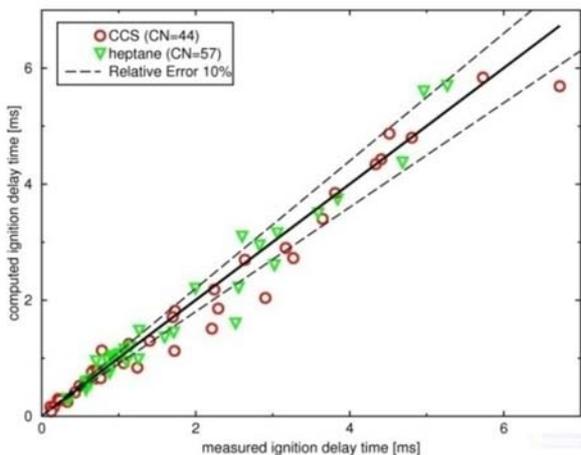
Nutzung verschiedener Energieträger

Das Zündverhalten, der Abbrand, die Russbildung, die Bildung von Stickoxiden aber auch die Gemischbildung und die Energiedichte werden durch den Treibstoff beeinflusst. Um die grossen Anforderungen an hoch effiziente und schadstoffarme Verbrennungssysteme erfüllen zu können, müssen deshalb auch die Eigenschaften der Brennstoffe in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Neue Rezepturen der traditionellen Treibstoffe Benzin und Diesel oder Gemische wie beispielsweise mit Wasserstoff oder biogenen Energieträgern stehen zur Diskussion. Hinzu kommen Treibstoffe aus ausschliesslich biogenem Material, die in Form von Biogas, Biodiesel oder Ethanol in motorischen Verbrennungssystemen eingesetzt werden. Ähnli-

che Themen und Aufgaben stehen auch für die atmosphärische Verbrennung, d.h. für Heizkessel, zur Diskussion.

Brennstoffe für homogene Brennverfahren

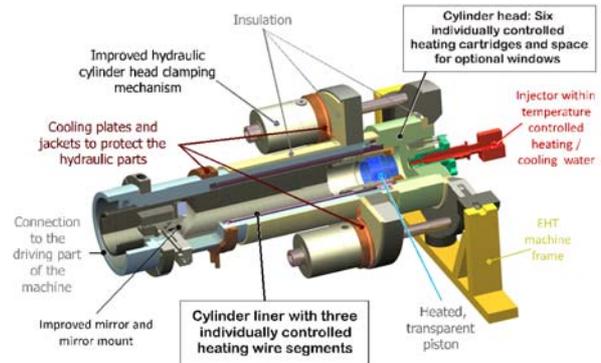
Homogene Brennverfahren für Dieselmotoren (HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition) versprechen eine massive Reduktion der Stickoxid- und Russemissionen. Sie bilden deshalb seit einigen Jahren einen Schwerpunkt in der dieselmotorischen Verbrennungsforschung. Ungelöst ist die Kontrolle dieses Brennverfahrens besonders bei hohen Lasten, tiefen Drehzahlen oder bei in-stationärem Betrieb. Die Selbstzündung des Gemisches erfolgt oft zu früh, was zu hohen Druckspitzen (Lärm, mechanische Belastung) und einem schlechten thermodynamischen Wirkungsgrad führt. Der heute in Dieselmotoren eingesetzte Kraftstoff eignet sich schlecht für das HCCI-Brennverfahren, da seine bei der dieselmotorischen Diffusionsverbrennung notwendige kurze Zündverzugszeit im homogenen Betrieb (also bei langen Vormischzeiten) zu einer zu frühen Zündung des Gemisches führt. Neben der Optimierung des Motors wird für das HCCI-Brennverfahren deshalb auch der Einsatz speziell geeigneter synthetisch hergestellter Brennstoffe geprüft. Dafür ist es notwendig, die Eigenschaften der eingesetzten Kraftstoffe gut – idealerweise mit einer oder mehreren Kennzahlen – zu beschreiben.



Figur 11: Gemessener und berechneter Zündverzug für n-Heptan und Diesel zeigen eine gute Übereinstimmung.

Im Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* [16] werden deshalb die Eigenschaften und die Eignung verschiedener Brennstoffe für das HCCI-Brennverfahren experimentell und theoretisch untersucht, um entsprechende Kennzahlen bestimmen zu können. Es ist

eng mit dem Forschungsvorhaben *Kraftstoffkennzahlen für homogene Verbrennung* der FVV [14] verknüpft. Neben der Uni Duisburg–Essen, der RWTH Aachen und der Uni Stuttgart sind mehr als 10 europäische Industriefirmen im Rahmen der FVV an diesem Vorhaben beteiligt.



Figur 12: Neukonstruktion von Zylinder und Zylinderkopf mit Klemmung für das Einhubtriebwerk



Figur 13: Klemmplatte mit den Spannzylindern für die Zylinderkopfklemmung und den zugehörigen Kühlmanschetten

Da detaillierte Reaktionsmechanismen für komplexe Brennstoffmischungen bisher noch kaum existieren und sie zudem für die Kopplung mit 3D-CFD-Simulationen zu komplex (d.h. langsam) sind, wird ein phänomenologisches Reaktionsmodell eingesetzt. Die Parameter dieses Grundmodells müssen für jeden betrachteten Kraftstoff mittels generischer Algorithmen optimiert werden. Durch die Kopplung dieser Reaktionsmodelle mit 3D-CFD-Simulationen können anschließend die innermotorischen Abläufe in HCCI Motoren detailliert untersucht werden. Im Berichtsjahr wurde ein geeignetes numerisches Reaktionsmodell ausgewählt und implementiert. In einem ersten Schritt wurden die Parameter des Modells mittels generischer Algorithmen für den Brennstoff n-Heptan optimiert; zuerst nur im Hinblick auf den Zündverzug der Hochtemperaturreaktion, dann gleichzeitig

auch für den Zündverzug und die Wärmefreisetzung der Niedrigtemperaturreaktion (Fig. 11). Die zugrunde liegenden experimentellen Daten stammen aus Messungen in einem Stosswellenrohr. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen dem Reaktionsmodell und den experimentellen Daten der Hochtemperaturreaktion gefunden werden. Auch die laufende Optimierung für mehrere Zielgrößen (Hoch- und Niedrigtemperaturreaktionen, Wärmefreisetzung) zeigt erste viel versprechende Resultate. Für die experimentelle Untersuchung der Brennstoffeigenschaften (Zündverzüge, Wärmefreisetzung) unter HCCI-Bedingungen ist das Einhubtriebwerk des Labors ein idealer Versuchsträger. Es ermöglicht Experimente unter motorischen Bedingungen bei gleichzeitig ausgezeichnetem Zugang zum Brennraum für optische Messverfahren. Wichtige Parameter für die Darstellung unterschiedlicher Motortypen wie das Kompressionsverhältnis und der Gaszustand im Zylinder vor Kompressionsbeginn (Druck, Temperatur, Zusammensetzung) können frei gewählt werden. Im Verlauf des Berichtsjahrs wurden erste Messreihen mit n-Heptan durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass für niedrig siedende Brennstoffe wie n-Heptan gute homogene Bedingungen auch im bisher unbeheizten Einhubtriebwerk realisierbar sind. Um auch für die erst bei höheren Temperaturen verdampfenden Brennstoffe gute homogene Bedingungen erreichen zu können, wurden neue, beheizte Bauteile für das Einhubtriebwerk entwickelt (Fig. 12, 13). Damit verdampfen auch die höher siedenden Kraftstoffe schnell genug, um bis zum Zeitpunkt der Selbstzündung eine homogene Brennstoff-Luft-Mischung zu bilden.

Abgasnachbehandlung von mit flüssigen Biotreibstoffen betriebenen Motoren

Die Entwicklung von Katalysatoren und Dieselpartikelfiltern wird mit grossen Anstrengungen vorangetrieben. Die noch wenig erforschten Auswirkungen von Biotreibstoffen auf diese Abgasnachbehandlungssysteme werden im Projekt *Influences of Biocomponents (FAME) on Emissions and on Exhaust Systems of HD-Diesel Engines (BioExDi)* [17] in der Abgasprüfstelle der Fachhochschule Biel untersucht. In verschiedenen Versuchsreihen mit unterschiedlichen Mischungen auf der Basis von Diesel und FAME (Fatty Acid Methyl Esters) werden Messungen mit SCR-Katalysatoren und Dieselpartikelfilter durchgeführt. Daraus werden

Schlussfolgerungen gezogen, um die Abgasnachbehandlungssysteme anzupassen.

Biogene Brennstoffe in der atmosphärischen Verbrennung

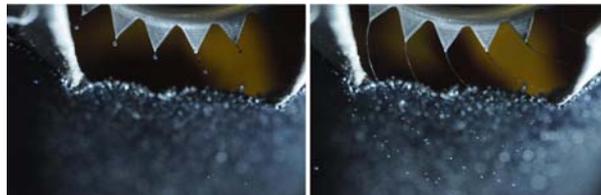
Die erforderliche Leistung von Heizöl betriebenen Wärmeerzeugungssystemen wird zunehmend kleiner. Bestehende Gebäude werden isoliert, neue nach Minergiestandard gebaut oder additive Heizsysteme wie Sonnenkollektoren eingebaut. Für einen optimalen Jahreswirkungsgrad müssen die Heizsysteme zudem mit modulierbarer Leistung betrieben werden können. Hinzu kommt die Forderung auch flüssige biogene Brennstoffe nutzen zu können. Mit konventionellen Systemen, bei denen die Brennstoffzufuhr über eine Düse erfolgt, liegt der untere Leistungsbereich bei 10 – 12 kW. Für kleinere Leistungen eignet sich die Vorverdampfer-technik. Das Heizöl wird durch ein vorgeschaltetes System verdampft und kann im Brennraum besser mit der Luft zu einem ruffrei brennbaren Gemisch vermengt werden. Nachteilig sind die Rückstände im System zur Vorverdampfung, die insbesondere bei biogenen Brennstoffen ein ungelöstes Problem sind.

Der Verdampfungsprozess und das Phänomen der Verkokung werden im Projekt *Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfer-technik (VVT)* [18] der Fachhochschule Nordwestschweiz für zwei verschiedene Vorverdampfungssysteme untersucht. Beim Plutobrenner der Schweizer Firma Toby AG wird das Öl nach der Zentrifugalzerstäubung auf einer durch Rauchgasrückführung beheizten Wand verdampft. Verdampfer und Brenner bilden bei diesem Verfahren eine fest verkoppelte Einheit. Der vom Ingenieur L. Griesser entwickelte Catvap-Brenner nutzt die Strahlungswärme der katalytischen Oxidation eines Teilstroms des zugeführten Brennstoffs. Die folgenden Brennstoffe werden im Projekt untersucht: Heizöl EL (Euro-Qualität), Ökoheizöl schwefelarm, Bio-Diesel und zwei Heizöl-Biodiesel-Blends.

Im Berichtsjahr wurde zuerst das Toby Verfahren untersucht. Das Ziel der ersten Projektphase war die Charakterisierung der Tropfenbildung. Nach der Analyse des Ausgangszustandes sollte eine Optimierung des Sprays durchgeführt werden. Ein optimierter Spray weist eine kleinere Standardab-

weichung der Tropfenverteilung auf und auch der Mittelwert der Tropfenverteilung ist kleiner. Ziel ist ein monodisperser Spray mit Tropfen $< 100 \mu\text{m}$. Durch Optimierung der Zerstäubung sollen die Parameter so eingestellt werden können, damit eine rückstandsfreie Verdampfung möglich ist. Ein für die Zerstäubungsqualität entscheidender Parameter ist die Art der Tropfenablösung am Rand des Rotationsbechers (Fig. 14). Mit einem optimierten Becher können kleinere Tropfen erzeugt werden. Zusätzlich ist das gesamte Tropfenspektrum schmaler. Für diesen Becher konnte weiter ein Modell erstellt werden, das eine Vorhersage der Tropfengrösse ermöglicht. Für die Erzeugung von Einzeltropfen mit denselben Parametern wie die des Zerstäubers konnte ein Tropfengenerator bestimmt werden. Messungen mit grossen Tropfen zeigen, dass die Messungen für bestimmte, be-

kannte Parameter mit der Theorie übereinstimmen. In den nächsten Messungen werden für die verschiedenen eingesetzten Medien die Verdampfungsmechanismen erfasst. Anhand dieser Messungen werden für kleine Tropfen die Ablagerungsbedingungen bestimmt. Zur Untersuchung des Catvap Verfahrens wurde zudem eine Versuchseinrichtung realisiert, die einen homogenen Brennstofffilm erzeugt.



Figur 14: Erzeugung von Brennstofftropfen mittels Rotationszerstäubung. Übergang vom Zerstäubungsmechanismus: Abtropfen zu Fadenzerfall aufgrund einer Erhöhung des Volumendurchflusses.

Nationale Zusammenarbeit

Ein Meilenstein für die nationale Zusammenarbeit 2009 war die an der ETH durchgeführte vom BFE mit organisierte Tagung *Verbrennungsforschung in der Schweiz* [19]. In 14 Referaten von Vertretern aus Hochschulen, Forschungsinstitutionen und Industrieunternehmen wurde der aktuelle Stand der Schweizer Verbrennungsforschung präsentiert. In speziellen Vorträgen von Industrievertretern wurden zudem die künftigen Herausforderungen aufgezeigt: Einerseits müssen Verbrennungsprozesse noch effizienter werden, andererseits gilt es, die Stickoxid- und Partikelemissionen erheblich zu senken. Im Motorenbereich für Fahrzeuge werden Grenzwerte verschärft, aber auch bei Flugzeugen wird die generelle Verbrauchsreduktion in Zukunft eine noch grössere Rolle spielen. Auch bei der Hochseeschifffahrt gelten künftig schärfere Emissionsgrenzwerte in Küstennähe, so dass Dieselmotoren mit grösserer Flexibilität bei der Treibstoffzusammensetzung zu entwickeln sind. Mit der Tagung wurden auch die Kompetenzschwerpunkte der Schweizer Forschenden verdeutlicht. Dazu gehören mittlere bis grösste Dieselmotoren und Gasturbinen. Spezielles Wissen wurde zudem zu Gasmotoren, Abgasmessung und -behandlung, sowie speziellen Messsystemen präsentiert.

An der 2009 zum 13. Mal durchgeführten *ETH-Conference Combustion Generated Nanoparticles* [20] wurde die Problematik der durch die Verbren-

nung 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 Vorgängen und zu den biologisch-medizinischen Wirkungsaspekten. Unter den 385 Teilnehmenden war das Ausland mit 20 Nationen in der Teilnehmerzahl sogar stärker vertreten als die Schweiz. Eine vernetzte Diskussion der Problematik und der Lösungsvorschläge wurde durch die Vertreter aus Wissenschaft, Behörden und Industrie ermöglicht. Interessant war zu erfahren, dass die neuen Abgasnormen der EU (Euro 5/6 für die Light-Duty-Vehicles und Euro VI für die Heavy-Duty-Vehicles) die Anzahl von Feststoffpartikeln erstmals im alveolengängigen¹ Grössenbereich festlegen und begrenzen. Die dafür notwendigen Messverfahren wurden in der Schweiz bereits eingeführt und erfordern nun den Einsatz hoch wirksamer Filter, um die Grenzwerte einhalten zu können. Interessant war auch das Referat von Prof. M. Jacobson von der Stanford University [21]. Er konnte nachweisen, dass die klimawirksamen Auswirkungen der Russpartikel (Black Carbon) massenspezifisch 1600-mal stärker wirksam sind als CO_2 . Damit wird die

¹ Alveole = Lungenbläschen (Gasaustausch zwischen Blut und Atemluft)

Bedeutung der Partikelfilter deutlich unterstrichen und vor Massnahmen zur CO₂-Reduktion bei Verbrennungsmotoren gestellt. Die Konferenz wurde von einer Ausstellung begleitet, an der Partikel-Messsysteme und -filter gezeigt wurden. Die Nach- oder Neuausrüstung von Dieselmotoren erfährt einen starken Zuwachs, was auch zur Weiterentwicklung der Systeme beiträgt. Probleme in der Praxis sind beispielsweise bei den Baumaschinen zu finden, die vorwiegend im Lastwechselbetrieb und in Einsatzgebieten mit wechselnder Brennstoffqualität gefahren werden. Die von einem grossen internationalen Netzwerk von Fachleuten getragene Konferenz ist für die Teilnehmenden unentgeltlich. Das BFE unterstützte die Konferenz finanziell.

Ein Informationsaustausch der Schweizer Industrie findet in der Fachgruppe Verbrennungsmaschinen des Verbands der Schweizer Maschinen-, Elektro- und Metallindustrie (Swissmem) statt.

Die Forscherteams der Schweizer Verbrennungsforschung pflegen jedoch auch über zahlreiche gemeinsame Projekte gute Kontakte. Dazu gehören verschiedene vom BFE mitfinanzierte Projekte. Zu nennen sind das Projekt *HERCULES* [9], in dem die ETHZ, das PSI sowie Wärtsilä Schweiz AG und ABB Turbosystems AG Partner sind. Zahlreiche Industriepartner sind im Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Cha-*

rakterisierung energieeffizienter Dieselmotoren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung [11] direkt oder indirekt involviert. Dazu gehören Duap AG, Kistler Instrumente AG, Iveco Motorenforschungs AG, Liebherr Machines Bulle SA und Hug Engineering AG. Das Projekt *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* [5] ist Teil des vom Swiss Competence Centre Energy und Mobility (CCEM) geführten Projekts Clean Efficient Large Diesel Engine (CELaDE) [22] in dem eine Zusammenarbeit zwischen der ETHZ, dem PSI und der Empa erfolgt. Im Projekt *Insulated and Catalyst-Coated Pistons (INCA)* [15] erfolgt eine Zusammenarbeit zwischen der Empa, der ETH und Nova Werke AG. Im Projekt *BioExDi* [17] arbeitet die Fachhochschule Biel mit der Empa und Hug Engineering zusammen. Das Projekt wird vom Forschungsprogramm Biomasse mitfinanziert und erhält zudem Mittel vom Bundesamt für Umwelt und von der Erdöl-Vereinigung [23]. Das an der Fachhochschule Nordwestschweiz bearbeitete Projekt *Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT)* [18] stützt sich auf die Zusammenarbeit mit der Firma Toby AG als Lieferant der Brenner und dem Verein Bio-Fuel als Lieferant der Bio-Brennstoffe. Das Projekt wird von der Erdölvereinigung mitfinanziert.

Internationale Zusammenarbeit

In mehreren vom BFE unterstützten Projekten erfolgt eine internationale Zusammenarbeit mit Hochschulen und Industriepartnern. Dazu gehört das von der EU mitfinanzierte Projekt *HERCULES* [9]: Neben den bereits erwähnten Schweizer Forschungsinstitutionen und Industriepartnern sind auch die Abo Akademi University, die Helsinki University of Technology, die National Technical University of Athens sowie die Wärtsilä Corporation Finnland beteiligt. Das Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* [16] war Teil einer internationalen Ausschreibung der FVV [14]. Das LAV der ETHZ erhielt den Zuschlag, was seine Kompetenz und die internationale Konkurrenzfähigkeit bestätigt. Eine Zusammenarbeit erfolgt mit den Universitäten Duisburg und Stuttgart sowie der Technischen Hochschule

Aachen. Auch das Projekt *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* [5] wird parallel zu Projekten der FVV bearbeitet, mit entsprechender Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen in Deutschland. Im Projekt *Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion* [2] erfolgt eine enge Zusammenarbeit mit der University of North Carolina aber auch mit der Universität Würzburg und der University of Birmingham in England. Durch die Aufnahme des Projekts in eine COST-Action der EU wird die internationale Zusammenarbeit erweitert werden.

Ein wichtiger Informationsaustausch und die Gelegenheit, die Schwerpunkte der Verbrennungsforschung international mitzugestalten, erfolgt in der Mitarbeit in Arbeitsgruppen der Internationalen

Energieagentur (IEA) [24]. Für die Verbrennung relevant sind das Implementing Agreement (IA) *Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion* (IA Combustion) [25], die *Working Party for Fossil Fuels* (WPFF) [26] und das Implementing Agreement *Advanced Motor Fuels* [27]. Die Schweiz ist in diesen Arbeitsgruppen vertreten.

Grössere Aktivitäten von Schweizer Vertretern erfolgen im IA *Combustion*. Hier ist das Ziel, die Entwicklung von Verbrennungstechnologien, die einen verminderten Treibstoffverbrauch und geringere Partikelemissionen aufweisen, für industrielle Anwendungen 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 Vermittlung Schweizerischer Forschungsergebnisse, die Bekanntmachung der Firmen aus der Schweiz, sowie die Weitergabe von Informationen über internationale Aktivitäten an Interessierte in der Schweiz. Im IA *Combustion* sind 12 Mitgliedsländer vertreten.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Rückblick

Mit der Tagung «Verbrennungsforschung in der Schweiz» konnte die Vielfalt und die Kompetenz der Forschenden aus Industrie und Hochschulen präsentiert werden. Das grosse Interesse am Anlass, die hoch stehenden Beiträge und die regen Diskussionen waren ein Erfolgsausweis für die Veranstaltung und eine gute Demonstration der Qualität der Verbrennungsforschung in der Schweiz.

Das Projekt *Investigation of Reactions and Species Dominating Low Temperature Combustion* [2] wurde mit zahlreichen neuen Erfahrungen abgeschlossen. Das Ziel, die genaue Bestimmung der Enthalpie der Peroxy-Radikale konnte noch nicht vollständig erreicht werden. Dank der Einbindung in die europäische COST-Action [4] wird eine breitere und internationale Abstützung der weiteren Arbeiten ermöglicht werden. Die weiteren 2009 bearbeiteten, bereits laufenden oder neu gestarteten Projekte liegen im vorgesehenen Zeitplan und erreichten die Zwischenziele.

Erfolgreich waren verschiedene Kontakte zur Industrie, die verstärkt die Zielsetzungen Schadstoffreduktion, Wirkungsgradverbesserung und Nutzung biogener Brennstoffe, welches auch die Ziele des BFE sind, priorisiert. Das 2008 abgeschlossene Projekt *HERCULES* wird in einem Folgeprojekt der EU weiterbearbeitet. Im vom BFE mitfinanzier-

ten Zusatzprojekt *HERCULES Beta* [9] können weitere Aspekte untersucht werden.

Durch die aktive Teilnahme an den Meetings des IA *Combustion* [25] konnte die neu gestarteten *Collaborative Tasks* mitgestaltet und Projektteilnehmer aus der Schweiz integriert werden. Der verstärkte Wissensaustausch auf internationaler Ebene ist ein Gewinn für alle Teilnehmenden.

Ausblick

Für 2010 werden im Forschungsprogramm Verbrennung vier Schwerpunkte verfolgt:

- Begleitung der laufenden Projekte und verstärkte Öffentlichkeitsarbeit zur Kommunikation der Ergebnisse;
- Initiierung und Start von neuen Projekten: Dazu gehört die Entwicklung kleinskaliger Verbrennungsmotoren, die Fortschreibung der Erforschung der Peroxy-Radikale im Rahmen der COST-Action und Projekte mit Industriebeteiligung;
- Fortschreibung der Vernetzung der Schweizer Forschenden aus Industrie und Hochschulen und Sensibilisierung für die Zielsetzungen des BFE;
- Konsolidierung der Schweizer Projektbeteiligung innerhalb des IA *Combustion*.

Liste der F+E-Projekte + Referenzen

- [1] Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011, www.bfe.admin.ch/themen/00519/index.html?lang=de&doc_id=00798
- [2] T. Gerber et al. (thomas.gerber@psi.ch), PSI-Villigen: Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion (SB Projekt 100'708)
- [3] SLS Swiss Light Source VUV; A beamline for Vacuum Ultraviolet Radiation; PSI Villigen <http://sls.web.psi.ch/view.php/beamlines/vuv/index.html>
- [4] European Cooperation in Science and Technology (COST) Action CM0901 Detailed chemical kinetic models for cleaner combustion; www.cost.esf.org
- [5] Y.M. Wright, K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe (JB Projekt 102688)
- [6] I. V. Karlin (karlin@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich (SB Projekt 100'862)
- [7] J. Mantzaras, N. Prasianakis, PSI-Villigen; Modeling of energy conversion processes at microscale with application to PEFCs (JB Projekt 103078)
- [8] K. Hermann, LAV/ETH-Zürich: HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber (SB Projekt 100706)
- [9] European Commission Seventh Framework Programme (FP7) Project Higher-efficiency engine with ultra-low emissions for ships HERCULES Beta, http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html
- [10] K. Hermann (kai.hermann@wartsila.com), Weiterentwicklung eines Referenzexperiments (Spray Combustion Chamber) in Bezug auf die Optimierung des Verbrennungssystems von Grossdieselmotoren; Wärtsilä Schweiz AG (JB Projekt 103241)
- [11] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselmotoren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung (Projekt 102859)
- [12] Förderagentur für Innovation (KTI); www.bbt.admin.ch/kti
- [13] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss (SB Projekt 47366)
- [14] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen FVV; <http://www.fvv.de>
- [15] Chr. Bach, P. Soltic, Empa Abteilung Verbrennungsmotoren, Insulated and Catalyst-coated Pistons (JB Projekt 103240)
- [16] B. Schneider, K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse (JB Projekt 101514)
- [17] J. Czerwinski Abgasprüfstelle Fachhochschule Biel, Influences of Biocomponents (FAME) on Emissions and on Exhaust Systems of HD-Diesel Engines (BioExDi), (JB Projekt 103206)
- [18] T. Griffin (timothy.griffin@fnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institute für Thermo- und Fluid-Engineering: Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT) (JB Projekt 102860)
- [19] Tagung Verbrennungsforschung in der Schweiz 28.10.2009, www.bfe.admin.ch/forschungverbrennung
- [20] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. 13th ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles
- [21] Mark Z. Jakobson, The Global and Regional Climate and Air Pollution Effects of Fossil-Fuel; Dept. of Civil & Environmental Engineering, Stanford University <http://www.stanford.edu/group/efmh/jacobson>
- [22] Competence Center Energy and Mobility Clean Efficient Large Diesel Engine http://ccem-ch.web.psi.ch/documents/CELaDE_webupdate.pdf
- [23] Erdöl Vereinigung (EV), www.erdoel-vereinigung.ch
- [24] International Energy Agency (IEA) <http://www.iea.org>
- [25] International Energy Agency (IEA) Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion <http://ieacombustion.com/default.aspx>
- [26] WPPF Working Party for Fossil Fuels der IEA <http://www.iea.org>
- [27] International Energy Agency (IEA), Implementing Agreement on Advanced Motor Fuels <http://www.iea-amf.vtt.fi>