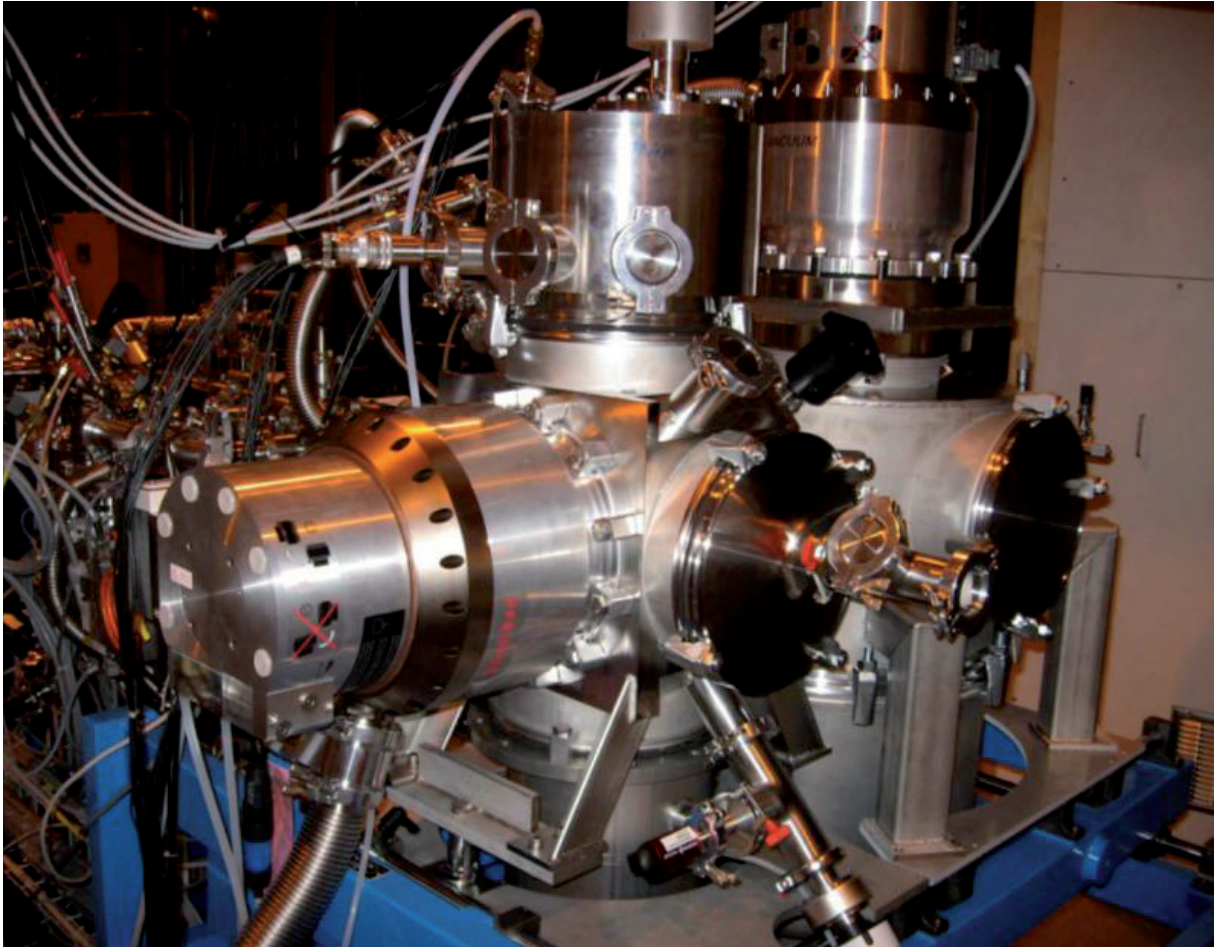


Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Verbrennung

Stephan Renz

renz.btr@swissonline.ch



Versuchsaufbau an der «Chemical Dynamic»-Strahllinie an der Swiss Light Source (SLS) am Paul-Scherrer-Institut (PSI)

Der Aufbau ermöglicht massen- und elektronenspektrometrische Messungen an Molekülen und Radikalen in der Gasphase. Dank aufwändiger Pumptechnik können Absorptionsmessungen in Gasmedien >10 mbar durchgeführt werden.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Verbrennung ist nach wie vor der wichtigste Prozess zur Umwandlung verschiedener Energieträger in die nutzbaren Energieformen Kraft und Wärme. Sowohl in der Schweiz (75 %) wie auch weltweit (85 %) wird weitaus der grösste Anteil am Gesamtenergieverbrauch durch die Verbrennung abgedeckt. Dafür werden vorwiegend die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas und Kohle genutzt. Der Anteil der erneuerbaren Energieträger wie Holz, Ethanol, Biogas oder Biodiesel, die durch Verbrennung in nutzbare Energieformen umgewandelt werden, ist zunehmend.

Durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern wird jedoch auch ein wertvoller und endlicher Rohstoff verzehrt. Nachteilig sind zudem der CO₂-Ausstoss sowie die Emission verschiedener für Menschen und Natur schädlicher Stoffe (z.B. Feinstaub, NO_x, CO). Die Verbesserung der Effizienz und die Reduktion der Schadstoffemissionen von Verbrennungssystemen haben deshalb hohe Priorität.

Die Schweizer Verbrennungsforschung ist international anerkannt und hat eine langjährige Tradition. Entwicklungszentren weltweit tätiger Unternehmen sind in der Schweiz domiziliert aber auch Motorenhersteller und zahlreiche Zulieferer der Verbrennungsindustrie tragen zu einem Umsatz von rund CHF 2 Mrd. bei. Der Bund setzt für die Verbrennungsforschung jährlich rund CHF 11 Mio. ein. Um im weltweiten Forschungsumfeld einen Beitrag leisten zu können, sind eine Konzentration und die Kontinuität in ausgewählten Themen erforderlich.

Die Zielsetzungen des Programms Verbrennung richtet sich nach den Vorgaben des *Konzepts der*

Energieforschung des Bundes [1] für die Periode 2008–2011:

Verbesserte Forschungsmethoden und -instrumente

Um die bestehenden Systemen gezielt zu verbessern, sind die Instrumente der Forschung wie physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger 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

Die erheblich verschärften Emissionsvorschriften (Euro 6, USA 2010/14) erfordern die Reduktion der emittierten Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxide sowie der festen Stoffe (Russ, Feinstaub). Hinzu kommt die Verminderung der Kohlendioxide.

Nutzung verschiedener Energieträger

Die Verbesserung des Wirkungsgrads und die Reduktion der Schadstoffe stellen auch neue Anforderungen an die Zusammensetzung der Brennstoffe. Die Palette der nutzbaren Brennstoffe wird zudem erweitert und die Verbrennungssysteme müssen auch für biogene Brennstoffe optimiert werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Verbesserung der Forschungsgrundlagen und -methoden

(Physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger)

Entsprechend dem hohen Stand der Technik und den laufend geforderten Verbesserungen, sei dies in den Bereichen der atmosphärischen Verbrennung (Brenner, offene Feuer), der nicht stationären Verbrennung (Motoren) oder der stationären Hochdruckverbrennung (Gasturbinen), sind die Anforderungen an die Instrumente und die Vorgehensweisen in der Verbrennungsforschung gross. Die Grundlagen und Methoden der Forschung sind deshalb stetig anzupassen und zu verbessern. Um die unterschiedlichen Funktionsweisen und Einflussfaktoren der chemischen, thermody-

namischen und kinetischen Prozesse in der Verbrennung zu verstehen und entsprechende Veränderungen zu bestimmen, genügen rein empirische Vorgehensweisen nicht mehr. Damit werden eher zufällige Resultate erzielt und ein enormer Aufwand ist dafür notwendig. Hilfreich sind hingegen Instrumente wie die numerische Modellierung der Prozesse, Versuchsträger – um beispielsweise Teilbereich der motorischen Verbrennung zu untersuchen – und geeignete Messmethoden. Mit der numerischen Modellierung können erhebliche Kosten für Versuche gespart werden. Die Versuchstände und die Messmethoden dienen der Validierung der theoretischen Modelle sowie dem Testen und dem Verbessern von einzelnen Komponenten des Gesamtsystems. Idealerweise werden verschiedene Methoden und Instrumen-

te der Forschung konzentriert eingesetzt und die Ergebnisse auch am realen Modell überprüft. In verschiedenen vom Bundesamt für Energie (BFE) unterstützten Projekten ist dies der Fall, wobei in der Regel mehrere Forschungsinstitutionen und Industrieunternehmen in einem internationalen Rahmen zusammenarbeiten.

Die Verbesserung der Forschungsmethoden und -instrumente hat auch immer einen Bezug zu den wirkungsorientierten Zielen der Verbrennungsforschung: Erhöhung des Systemwirkungsgrads, Reduktion der Schadstoffemissionen sowie Nutzung verschiedener Energieträger.

Zündverhalten der Peroxy-Radikale

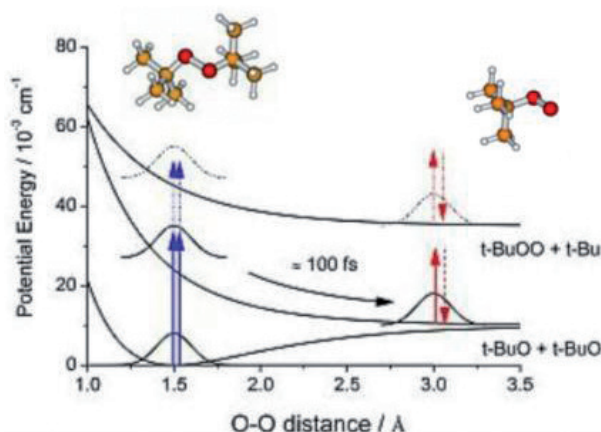
Der Zündvorgang hat einen grundlegenden Einfluss auf den Verlauf der Verbrennung und damit die Entwicklung von Schadstoffen, insbesondere von Russ. Das Zündverhalten wird weitgehend durch Peroxy-Radikale bestimmt. Sie bestimmen die Art und die Zusammensetzung der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung der nachfolgenden Reaktionen. Trotz intensiven Studien ist die quantitative Beschreibung der Prozesse im Zündvorgang noch nicht gesichert. Vielmehr beruht die Beschreibung auf zwar glaubwürdigen, aber letztlich nicht validierten Modellen. Als Folge davon ist die numerische Simulation des Verbrennungsprozesses durch diese Ungenauigkeit fehlerhaft oder wird durch die Ungewissheit belastet. Dies umso mehr, als sich bereits kleine Fehler in der Simulation der Spezifikation des Zündprozesses in der Berechnung der folgenden Reaktionen potenzieren. Diese Situation kann nur geändert werden, indem die Peroxy-Radikale auf molekularer Ebene genau beschrieben werden.

Für die Darstellung von Peroxy-Radikalen wurden im Projekt *Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion* [2] der Gruppe «Molekulare Dynamik» des Paul Scher-

erer Instituts (PSI) eine neue Molekularstrahl-Apparatur konstruiert und in Betrieb genommen. Neuartige Radikalen-Quellen werden fortlaufend modifiziert und im Hinblick auf die effiziente Darstellung von bestimmten Radikalen optimiert. Mit Hilfe einer elektrischen Gasentladung können unter günstigen Umständen spezielle Radikale gezielt erzeugt werden. Nach der Entladung kann dem aus der Entladungskammer strömenden Gas ein weiteres Gasgemisch beigefügt werden. Damit ist es möglich, kurz vorher erzeugte Radikale mit neutralen Molekülen reagieren zu lassen. Die Versuchseinrichtung erlaubt es, gleichzeitig lineare und nichtlineare spektroskopische Messungen an Molekülen in einem Molekularstrahl durchzuführen. Dafür stehen im PSI-Labor ein Nanosekunden- und ein Femtosekunden-Laser zur Verfügung (siehe Figur 1). Hinzu kommt die *Chemical Dynamics Beamline* am «Swiss Light Source»(SLS)-Synchrotron am PSI, die eine gute spektroskopische Basis zur Erfassung der Alkyl-Peroxy-Radikalen darstellt.

Im Berichtsjahr konnten in zwei Dissertationen weiterführende Erkenntnisse über Rydbergzustände von Formaldehyd sowie über die Dynamik von Zuständen im Bereich der Dissoziationschwelle gewonnen werden. Ein Teil der Arbeit wurden in einer synergetischen Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. F. Merkt an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) erarbeitet. Die jetzt im Betrieb stehende «*VacuumUltraViolet*» (VUV) Strahllinie an der SLS [3] wird wesentliche Daten von komplizierteren Molekülen liefern, ohne die die laserspektroskopischen Messungen nicht angegangen werden könnten. Laserspektroskopische Messungen können dann mit massenspektrometrischen Messmethoden kombiniert eingesetzt werden, um die Reaktionsmechanismen und die Dynamik von Alkyl-Peroxy-Radikalen aufzuzeigen. Aus den Messungen können thermochemische Daten dieser für die Zündung von Flammen wichtigen Radikale mit grösserer Genauigkeit bestimmt werden.

Erste Versuche zur Bestimmung des Dissoziationsverhaltens von Peroxy-Radikalen mit einem fs-Pump-Probe-Verfahren wurden durchgeführt. Dazu wurde *ter-Butyl-Peroxid* verwendet. *ter-Butyl-Peroxid* ist eines der wenigen stabilen Peroxide und eignet sich deshalb als Ausgangsstoff für Testversuche. Darüber hinaus ist *ter-Butyl-Peroxid* als Brennstoffzusatz von einigem Interesse. Für den Fortgang der Arbeit auch mit anderen Peroxy-Radikalen erweisen sich die Absorptionsmessungen, die an der VUV-Strahllinie registriert werden können, als grosser Fortschritt. Weitere wertvolle Daten werden die Messungen von Ionisations- und Dissoziationsschwellen liefern.

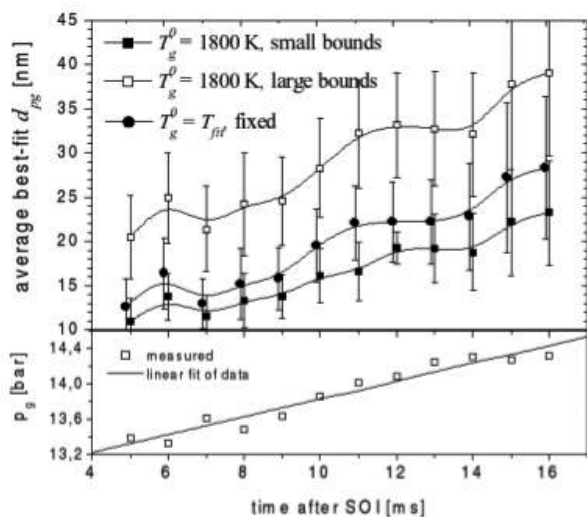


Figur 1: Femtosekunden-«Four Wave Mixing» (fs-FWM): Zerfallsschema von Di-Ter-Butyl-Peroxid.

Methoden zur Erfassung der Russpartikelgrößen

Die Beobachtung und Erfassung der innermotorischen Entwicklung der Russpartikelgröße bei verschiedenen Betriebszuständen dient einem besseren Verständnis der Russbildung und Russoxidation bei der Dieselverbrennung. Dafür ist die Entwicklung von in-situ-Messungen, die bei verschiedenen Betriebsparametern wie Einspritzdruck, Brennraumtemperatur und -druck online möglich sind, notwendig.

Zur Bestimmung der mittleren Partikelgröße von Russ während der Diesel-Verbrennung wurde im Projekt *Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures* [4] die Methode der zeitaufgelösten *Laser-induzierten Inkandescenz (LII)* an der am PSI betriebenen Hochdruck-Einspritzkammer eingesetzt. Das «2-Farben LII»-Experiment zur Bestimmung der Russpartikelgröße und zur simultanen Registrierung räumlich aufgelöster Russemissionsspektren wurde weiter verbessert. Transiente LII-Signale wurden zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einspritzbeginn bei Gegendrücken zwischen 1 MPa und 3,5 MPa und bei Einspritzdrücken von 50–130 MPa aufgezeichnet. Das Abkühlverhalten der durch Laser aufgeheizten Partikel wurde durch Lösung der Transportgleichungen für Masse und Energie berechnet. Ein thermo-physikalisches Modell wurde verwendet, um theoretisch berechnete Kurven an die experimentell bestimmten LII-Abklingkurven unter Variierung verschiedener Parameter anzupassen. Die Auswertungen ergaben mittlere Partikeldurchmesser der Russteilchen zwischen 10–20 nm, je nach Gasdruck, Einspritzdruck sowie dem Zeitpunkt nach Einspritzbeginn, (5–16 ms). Insbesondere zeigte sich, dass bei einer ein-



Figur 2: Die Russteilchen wachsen proportional zu der seit der Einspritzung vergangenen Zeit.

gestellten Gastemperatur von 773 K, einem Gasdruck von ca. 1,4 MPa und einem Einspritzdruck von 50 MPa der mittlere Partikeldurchmesser mit der Brenndauer kontinuierlich von ca. 10 nm auf 20 nm zunimmt. Unter den gegebenen Bedingungen wachsen demnach die Russteilchen noch 16 ms nach Einspritzbeginn (siehe Figur 2).

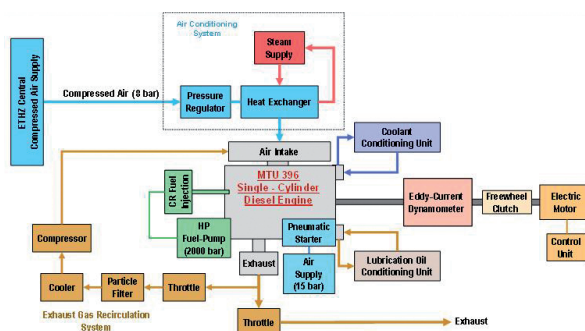
Die Ergebnisse waren weit gehend unabhängig von der Annahme einer konkreten Teilchenverteilung und der Umgebungstemperatur, was auf eine hohe Robustheit der Auswertmethode hinweist. In dem zwischenzeitlich abgeschlossenen Projekt wurde das Ziel, die Russverteilung in Sprayflammen zweidimensional zu erfassen, erreicht. Zudem wurde die Methodik im Experiment realisiert, und die Vorgehensweise zur Auswertung der gemessenen Daten wurde etabliert.

Das Ziel, vollständige Messserien zu den Eigenschaften einzelner Dieselmotormischungen zu erstellen, wurde hingegen nicht erreicht. Dafür werden weitere Arbeiten notwendig sein.

Numerische Simulationsmethoden

Die numerischen Simulationsmethoden wie beispielsweise die *Computational Reactive Fluid Dynamics* (CRFD) sind heute wichtige Instrumente für die Entwicklung und Verbesserung technischer Produkte. Das Ziel ist, aufwändige Messreihen und Versuchsanstaltungen durch kostengünstige und zeiteinsparende Simulationsberechnungen zu ersetzen. Am Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) der ETHZ wurden erfolgreich Rechen-Codes für die Simulationen von Verbrennungsprozessen entwickelt und Erfahrungen damit gesammelt.

Ziel des Projekts *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* [5] ist die Erweiterung bestehender Simulationswerkzeuge, um neuartigen Brennverfahren und unterschiedlichen Kraftstoffeigenschaften Rechnung tragen zu können und präzise Vorhersagen zu ermöglichen. Zu diesem Zweck werden in Zusammenarbeit mit anderen



Figur 3: Schematische Darstellung des Einzylinder-Dieselmotors MTU 396.

nationalen und internationalen Forschungsvorhaben wertvolle Synergien genutzt. Die Problematik wird dabei von vier Seiten angegangen: Jeweils paarweise ein experimenteller Teil zur Bereitstellung der Validierungsdaten und parallel dazu die Simulations-Code-Entwicklungsarbeit. Die zweite «Achse» besteht in der gezielten Ausnutzung der jeweiligen Vorteile von motorischen Versuchsträgern (welche die Validierung an technisch relevanten Verbrennungsvorgängen anhand globaler Grössen wie beispielsweise dem Zylinderdruck erlaubt) und von «generischen» Experimenten an optisch zugänglichen Verbrennungskammern und Einhubtriebwerken (welche zusätzlich wertvolle, örtlich aufgelöste Informationen für die Submodellvalidierung und -kalibrierung liefern).

Im Jahr 2008 konnte am LAV ein «MTU 396»-Einzyylinder-Heavy-duty-Forschungsmotor erfolgreich in Betrieb genommen werden, welcher einen flexiblen Austausch der Instrumentierung zulässt (schnelle Entnahmesonde, Mehrwellenpyrometrie, Ionenstrom-Sonden etc., siehe Figuren 3 und 4). Der bestehende *Conditional Moment Closure Code* wurde mittels Daten eines vorher ausgemessenen Heavy-duty-Motors für einen weiten Bereich von Betriebsbedingungen anhand von Druckverläufen, Brennraten und NO_x -Emissionen erfolgreich weiter validiert. Die Validierung erfolgte für einen konventionellen Dieselmotorkraftstoff. Eine letzte Untersuchung wurde zur Publikation am *SAE World Congress* im April 2009 eingereicht. Erste Modifikationen für die Inbetriebnahme des Einhubtriebwerks im «dual-fuel»-Betrieb, d.h. mit homogener Grundladung und Zündung mittels Dieselpilot, sind erfolgt und eine umfangreiche Literaturstudie zu diesem Brennverfahren weitgehend abgeschlossen. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Stellenbesetzung konnten auf der Seite der Kraftstoffvariationen noch keine Messungen durchgeführt werden. Alle vorbereitenden Arbeiten sind im Wesentlichen abgeschlossen



Figur 4: Modifizierter Zylinderkopf mit der Commonrail-Einspritzdüse.

und Infrastruktur und Messausrüstung stehen ebenfalls bereit; Evaluationen und Interviews mit potenziellen Kandidaten erfolgen laufend.

2009 wird der Schwerpunkt der Arbeit auf der Generierung experimenteller Daten mit den verschiedenen Versuchsträgern liegen, wobei die Simulation begleitend ausgebaut wird.

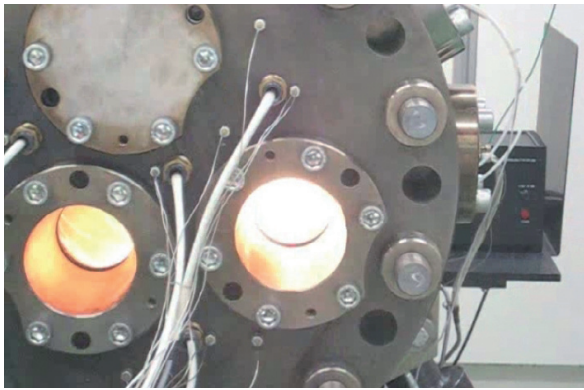
Erhöhung des Systemwirkungsgrads und Reduktion der Schadstoffemissionen

Massnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrads der Verbrennung bewirken in zahlreichen Fällen eine Erhöhung der Schadstoffemissionen und umgekehrt. So sind beispielsweise hoher Druck und hohe Verbrennungstemperaturen Voraussetzungen für einen hohen Wirkungsgrad, bewirken jedoch eine Zunahme der Bildung von NO_x . In Projekten zur Verbesserung des Verbrennungssystems müssen somit immer beide Bereiche betrachtet und die Auswirkungen der Veränderungen umfassend abgeklärt werden. Diese Voraussetzungen sind in den vom BFE unterstützten Projekten gegeben. Verstärkt wird auch das Gesamtsystem, d.h. von der Brennstoffzusammensetzung, Brennstoffaufbereitung über die Verbrennung bis zur Abgasnachbehandlung, in die Betrachtungen miteinbezogen. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die Nachteile eines Teilsystems mit einem anderen Teilsystem zu korrigieren. Ein Beispiel ist die Abgasnachbehandlung, die wirkungsvoll zu hohe Stickoxid-Werte reduzieren kann.

Grossvolumige Dieselmotoren

Im EU-Projekt *HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships)* [6] werden neue Technologien in Bezug auf grosse Schiffsdieselmotoren entwickelt. Schweizer Partner sind Wärtsilä Schweiz AG, ABB Turbosystems AG, das LAV der ETHZ, das PSI und die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa). Ein Teilprojekt befasst sich mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für dessen Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Im vom BFE unterstützten Projektteil wurde ein experimenteller Versuchsträger entwickelt, der das Verbrennungssystem grosser 2-Takt-Schiffsdieselmotoren unter Berücksichtigung der charakteristischen Bedingungen weitestgehend repräsentieren soll, um die benötigten Referenzdaten zu generieren.

Die Inbetriebnahme der sogenannten «Spray Combustion Chamber»- inklusive aller peripheren Systeme des neuen komplexen Versuchstandes – konnte im Berichtsjahr abgeschlossen werden (Figur 5). Dabei wurde insbesondere auch die komplexe Steuerung der Anlage in Be-



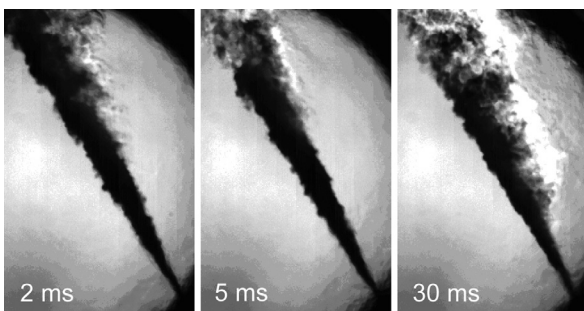
Figur 5: «Spray Combustion Chamber» in Betrieb.

zug auf die Ansteuerung (Trigger) externer messtechnischer Geräte (Laser, Kamera) sowie die Datenerfassung bzw. -verarbeitung um wesentliche Optionen ergänzt. Ausserdem konnte das hinsichtlich schiffsdieselmotorischer Verbrennung realistische Einspritzsystem in Bezug auf die Erfassung aller hydraulischen Drücke (Rail, Düse), der Brennstoffmasse sowie des Nadelhubs weiter entwickelt werden, woraus das Einspritzverhalten ersichtlich ist.

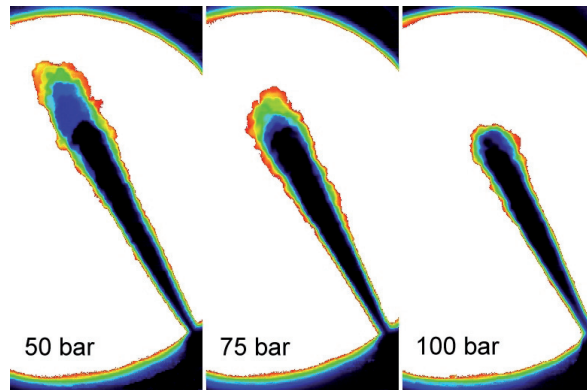
Schliesslich bestätigten umfangreiche Untersuchungen (Kennfeldmessungen) und Tests (Limiten) die gemäss Auslegung zu erwartenden Spezifikationen (Druck, Temperatur, Drall).

Die ersten Messkampagnen zur Untersuchung des Verbrennungssystems (Einspritzung, Zündung und Verbrennung) unter Variation diverser Betriebsparameter erfolgten mit Hilfe der Schattenbildtechnik. Durch die Anwendung eines high-speed-Systems (Kamera, Beleuchtung) im kHz-Bereich sowie des Einsatzes entsprechender optischer Filter (Eigenleuchten) konnte die Entflammungsphase (Zündverzug) sowie der Verbrennungsfortschritt erfasst werden (Figur 6).

Die statistische Analyse aus Messungen bei konstanten Bedingungen unter Variation eines Parameters (z.B. Kammerdruck) ergeben die mittlere Einspritzstrahlausbreitung bzw. zeigen auch deren Fluktuation (Figur 7).



Figur 6: Visualisierung Zündung und Verbrennung.



Figur 7: Analyse Einspritzstrahlausbreitung.

Mit der definitiven Inbetriebnahme dieses novitären Prüfstandes steht den Schweizer Forschungspartnern aus Industrie und Hochschule nun ein langfristig einsetzbares F&E-Instrument zur Erhöhung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit auf diesem Gebiet zur Verfügung. Die Entwicklungsziele sind weitgehend erreicht worden, und auch die ersten messtechnischen Versuche sind bisher relativ vielversprechend verlaufen.

Eine weitere Bestätigung der bisherigen Anstrengungen bzw. des grossen Interesses an diesem Projekt zeigt sicher auch die Weiterführung in einem von den Verantwortlichen der EU gutgeheissenen Nachfolgeprojekt (HERCULES β) innerhalb des 7. EU-Forschungsrahmenprogrammes.

Optimierung von Brennverfahren und Abgasnachbehandlung

Die Forderung, die Funktionsweise und die Einflussfaktoren des gesamten Verbrennungssystems – d.h. von der Brennstoffaufbereitung bis zur Abgasnachbehandlung – in die Betrachtungen mit einzubeziehen, wird im Ende 2008 gestarteten Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselmotoren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung* [7] 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. Von Interesse sind insbesondere «Medium»- und «Heavy-duty»-Dieselmotoren, für welche die Erfüllung zukünftiger, noch strengerer Emissionsvorschriften (z.B. EURO 6) möglichst mit einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads (CO_2 -Reduktion) einhergehen muss. Die zu entwickelnden Werkzeuge werden an einem eigens dazu aufzubauenden leistungsstarken, transienten Prüfstand evaluiert und kontinuierlich verbessert.

Die Problematik der durch die Verbrennung erzeugten Partikel war an der 12. *ETH-Konferenz Combustion Generated Nanoparticles* [8] ein Thema, das interdisziplinär behandelt wurde. Unter den 350 Teilnehmenden war das Ausland mit 24 Nationen in der Teilnehmerzahl sogar etwas stärker vertreten als die Schweiz. Eine vernetzte Diskussion der Problematik und der Lösungsvorschläge wurde durch die Vertreter aus Wissenschaft, Behörden und Industrie ermöglicht. Neben den technischen Sessions, in denen versucht wurde, den Bogen von der Partikelentstehung in der Verbrennung, über die atmosphärischen Vorgänge, zur Abgasnachbehandlung und zur Messtechnik zu spannen, haben vor allem die beiden Sessions zu biologisch-medizinischen Wirkungsaspekten und der Fokus-Event, diesmal zu den europäischen Low-Emission-Zonen, an Bedeutung gewonnen.

Das Spektrum an Forschungs- und Entwicklungsthemen wird naturgemäss immer breiter. Während anfänglich die Fragen zu Partikelcharakterisierung, Probenentnahmetechnik und Messtechnik im Vordergrund standen, die inzwischen den Sprung in die EU-Direktiven geschafft haben, ist jetzt eine Vielzahl von Schwerpunkten zu verfolgen. Dabei ist die Weiterentwicklung der motorischen Verbrennungstechnik, die Vielfalt in der Weiterentwicklung von Brennstoffen und die Akzeptanz der Abgasnachbehandlung für neue Motorengenerationen deutlich zu erkennen.

Deutlich wurde auch, dass die Nachrüstung von Dieselmotoren mit Partikelfiltern – vor 2000 ein kleines Segment im Arbeitsschutz im Bergbau – nun als einziges Mittel zur Verbesserung der Luftqualität breite Akzeptanz gefunden hat. Die Tatsache aber, dass sich hier ein grosser neuer Markt auftut, ruft nun auch grosse Industrien auf den Plan. Damit wird Geld für Forschung frei und mit der intensiven Weiterentwicklung von Materialien und katalytischen Prozessen ist mittelfristig sehr viel Wertschöpfung zu erwarten.

Das BFE unterstützte diese für die Teilnehmenden unentgeltliche jährliche Konferenz mit einem Beitrag. Das grosse internationale Netzwerk von Fachleuten und der nach wie vor grosse Handlungsbedarf sind das Fundament für die Wirkung der Veranstaltung.

Nutzung verschiedener Energieträger

Um die grossen Anforderungen an hoch effiziente und schadstoffarme Verbrennungssysteme erfüllen zu können, müssen auch die Eigenschaften der Brennstoffe in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Im motorischen Bereich sind die Möglichkeiten für den Ersatz oder die Verbesserung der traditionellen Treibstoffe Benzin und Diesel zu prüfen. Das Zündverhalten, der Abbrand, die

Russbildung, die Bildung von Stickoxiden aber auch die Gemischbildung und die Energiedichte werden durch den Treibstoff beeinflusst. Neue Rezepturen der Treibstoffe 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. Ähnliche Themen und Aufgaben stehen auch für die atmosphärische Verbrennung, d.h. in Heizkesseln, zur Diskussion.

Brennstoffe für homogene Brennverfahren

Die Entwicklung von *homogenen Brennverfahren für Dieselmotoren (HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition)* ist seit einigen Jahren ein Schwerpunkt in der Forschung im Gebiet der dieselmotorischen Brennverfahrensentwicklung. Dem Potenzial der selbstgezündeten, homogenen Verbrennung (massive Reduktion der Stickoxid- und Russemissionen) stehen grosse Schwierigkeiten bei der Kontrolle dieses Brennverfahrens gegenüber. Da in einem Dieselmotor keine externe Zündung vorhanden ist, muss der Zeitpunkt des Verbrennungsbeginns im homogenen Betrieb alleine über den Gemischzustand im Zylinder gesteuert werden. Besonders bei hohen Lasten und tiefen Drehzahlen erfolgt die Selbstzündung des homogenen Gemischs aber 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 Gemischs führt. Von grosser Bedeutung ist daher für die zukünftige Gestaltung von effizienten, emissionsarmen HCCI-Systemen die gezielte Abstimmung der Zusammensetzung der eingesetzten Kraftstoffe auf diese neuen Anforderungen. Das Schwergewicht liegt dabei auf realisierbaren Mehrkomponentenkraftstoffen, wobei sowohl herkömmliche wie auch speziell entwickelte «Designer-fuels» eingesetzt werden können.

Das Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* [9] befasst sich mit der experimentellen und theoretischen Untersuchung der Selbstzündung und Verbrennung von Brennstoff-Luft-Gemischen, wie sie in HCCI-Motoren im homogenen Betrieb vorhanden sind. Es ist eng verknüpft mit dem Forschungsvorhaben «Kraftstoffkennzahlen für homogene Verbrennung» der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [10]. Das vorliegende Projekt ist ergänzend zum FVV-Projekt

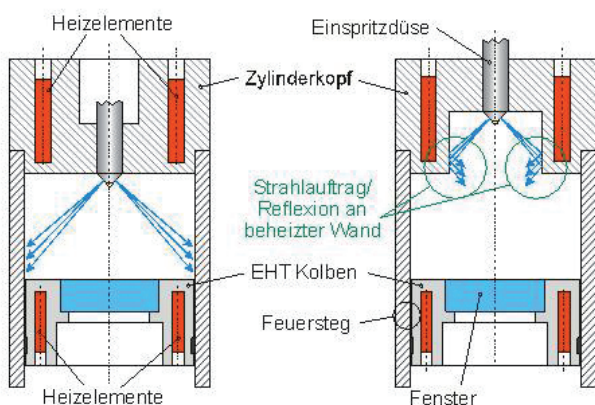
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	CEC-RF	n-Heptan	Naphtha 1	Naphtha 2	Kero 1	Kero 3	CCS-Fuel	Diesel 1	Diesel 2	Diesel 3
SM-Nr.			VW	Shell	07-S-001830	07-S-001906	VW	07-S-001935	07-S-001907	07-S-001908
Aromat %					25					
Naphten %			11		30	40	60			
Paraffin %		100	70	80	45	50	40	100	100	100
Olefin %			19	20		10				
Distillation										
IBP °C	220	98	80	40	153	149	157	192	199	224
5%	240		91	81	166	162	165	198	213	240
10%	245		95	90	166	163	167	202	221	246
50%	≥ 245		112	120	177	168	176	246	273	276
90%	325		139	150	247	292	192	306	310	312
95%	345-350		146	156	267	313	200	319	323	324
FBP	<370	98	165	180	283	317	215	327	330	333
CN			35	55	38	52,3	47,1	50	57	67

Figur 8: Kraftstoffmischungen im FVV Projekt «Kraftstoffkennzahlen für homogene Verbrennung».

«Kraftstoffkennzahlen» (siehe Figur 8) das Bindeglied auf der numerischen und experimentellen Seite zwischen Stosswellenrohrmessungen (Uni Duisburg–Essen) und motorischem Experiment (RWTH Aachen, Uni Stuttgart). Mehr als 10 europäische Industriefirmen sind im Rahmen der FVV an diesem Vorhaben beteiligt.

Die 2008 geleisteten Arbeiten umfassen in erster Linie eine systematische Suche nach der besten Einspritzstrategie und Zylinderkopfgestaltung für eine optimale Homogenisierung des Brennstoff-Luft-Gemischs zum Zeitpunkt der Selbstzündung. Dies ist in dieser Arbeit besonders wichtig, da die zu untersuchenden Kraftstoffe grosse Variationen bezüglich ihrer Verdampfungseigenschaften besitzen. Dazu wurden in der Berichtsperiode deutlich über 100 sehr aufwendige CFD-Berechnungen durchgeführt, jeweils mit mehr als einem Tag Rechen- und Auswertzeit.

Auf der experimentellen Seite wurde im Verlauf des Jahres 2008 das Einhubtriebwerk des LAV grundlegend revidiert; einzelne Anlagenkomponenten mussten ganz ausgetauscht werden. Inzwischen ist es wieder in Betrieb und bereit für die experimentellen Untersuchungen des laufenden Projektes.

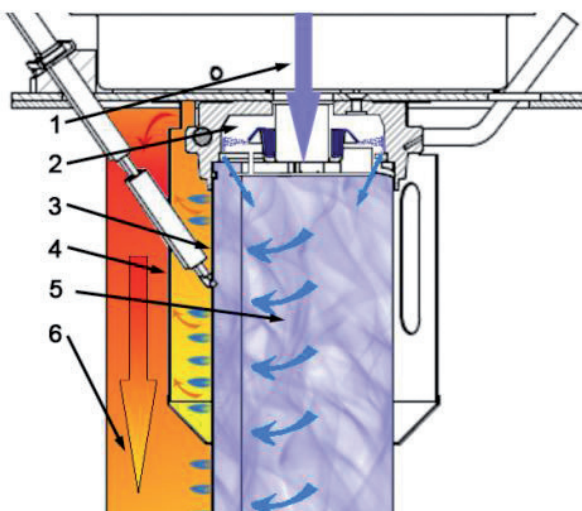


Figur 9: Links bestehender Zylinderkopf des EHT, rechts Variante mit einer Mulde. Der Einspritzstrahl trifft auf die vorgewärmte Muldenwand und verdampft schneller.

Um den Anteil des im realen Zylinders an der heißen Wand verdampften Brennstoffs besser nachbilden zu können, wurde im Einhubtriebwerk eine Mulde im Zylinderkopf vorgesehen. Diese kann einfacher als die Zylinderwand vorgewärmt werden. Durch die Reflexion des Einspritzstrahls an der Muldenwand wird zudem verhindert, dass viel flüssiger Brennstoff auf die kalte Zylinderwand aufgetragen wird. (siehe Figur 9).

Biogene Brennstoffe in der atmosphärischen Verbrennung

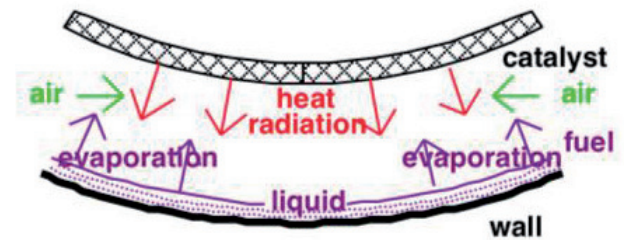
Die heute vom Markt geforderte Flexibilität von Heizölsystemen wird immer grösser. Diese Flexibilität betrifft sowohl den Leistungsbereich als auch die tolerierten Brennstoffeigenschaften. Der Trend geht zu kleineren und besser modulierbaren Systemen. Moderne Einfamilienhäuser weisen heute auf Grund der guten Wärmeisolation einen Wärmeleistungsbedarf von deutlich weniger als 12 kW aus.



Figur 10: Schematische Darstellung des Plutobrenners 1 Zuluft, 2 Schleuderbecher mit Öl-Spray, 3 Flammhalter mit Flamme, 4 Umlenkkragen, 5 Mischzone von Luft und Öl, 6 Abgasstrom.

Wenn Heizsysteme zusätzlich zur Ölheizung noch mit Alternativenergie, zum Beispiel Sonnenkollektoren, ausgerüstet sind, so variiert die durch Verbrennung erzeugte Wärmemenge je nach Jahreszeit und Wetterverhältnissen für Heizung und Warmwasser stark. Ähnlich wie bei grösseren Anlagen wird heute auch im Kleinleistungsbe- reich eine gleitende Fahrweise verlangt, um die Leistung des Brenners dem effektiv erforderlichen Wärmebedarf anzupassen.

Lösungsmöglichkeiten für Ölbrenner kleiner Leistung werden im Ende 2008 gestarteten Projekt *Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbe- reichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Öl- brennern mit Vorverdampfertechnik (VVT)* [11] untersucht. Dabei werden der Verdampfungspro- zess und das Phänomen der Verkokung in zwei verschiedenen VVT-Brennern durch Simulations- versuche charakterisiert und die Betriebsgrenzen für rückstandsreiche Verdampfung bestimmt. Durch Anwendung von Parameterstudien und einem nu- merischen Modell sollen Design-Lösungen für ver- schiedene Leistungsbereiche vorgeschlagen wer- den. Die folgenden Brennstoffe werden im Projekt untersucht: Heizöl EL (Euro-Qualität), Ökoheizöl schwefelarm, Bio-Diesel und zwei Heizöl-Biodie-



Figur 11: Funktionsdarstellung der katalytisch beheizten Verdampfung (Catvap-Brenner).

sel-Blends. Es werden zwei unterschiedliche Öl- brenner mit Vorverdampfertechnik eingesetzt. 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 Ein- heit (siehe Figur 10).

Der vom Ingenieur L. Griesser entwickelten Cat- vap-Brenner nutzt die Strahlungswärme der katal- ytischen Oxidation eines Teilstroms des zuge- führten Brennstoffs (Figur 11). Der Brennstoff kommt für die Verdampfung somit nicht mit einer heissen Fläche in Berührung und das System ist unabhängig vom nachfolgenden Prozess.

Nationale Zusammenarbeit

Die Forscherteams der Schweizer Verbrennungs- forschung pflegen oft über gemeinsame Projekte gute Kontakte und kennen ihre Aufgabengebiete. Darüber hinaus gehende Kontakte werden bei- spielsweise durch die Hochschulkompetenzgrup- pe für Verbrennungsmotoren (HKV) [12] gepflegt. Sie trifft sich jährlich zu einem Informationsaus- tausch über die Aktivitäten der verschiedenen Fachhochschulen. Auch Forschende aus dem ETH-Bereich sowie einzelne Akteure der Indus- trie sind darin vertreten. Die Schweizerische Ver- einigung für Verbrennungsforschung (SVV) [13] koordiniert die Aktivitäten im ETH-Bereich mit Beteiligung der Industrie. Die Interessengruppe «Combustion and Pollutant Formation (Meas- urement & Modeling Techniques)» des Leonhard Euler Centers der European Research Commu- nity On Flow, Turbulence And Combustion (ER- COFTAC) [14] beschäftigt sich in internationalem Kontext mit Fragen der numerischen Simulation von Strömungen. Dazu gehören auch Themen der Verbrennungsforschung. Im Berichtsjahr wurde keine Tagung über die Verbrennungsfors- chung in der Schweiz durchgeführt. Diese vom BFE mitorganisierte Veranstaltung findet alle zwei Jahre statt und wird wiederum 2009 durchgeführt werden. Für die Verbrennungsforschung inte- ressante, in der Schweiz durchgeführte Veran-

staltungen waren die *ETH-Konferenz über Com- bustion generated Nanoparticles* [8] und der vom PSI organisierte *7. International Workshop on Catalytic Combustion* [15]. Ein Informationsaus- tausch der Schweizer Industrie findet in der Fach- gruppe Verbrennungsmaschinen des Verbands der Schweizer Maschinen-, Elektro- und Metall- Industrie (Swissmem) statt. Die Programmleitung des BFE nahm an diversen Veranstaltungen der vorgeannten Gruppen teil und informierte über die Ziele der Forschung und die Möglichkeiten der Förderung.

In zahlreichen Forschungsprojekten erfolgt eine gute Zusammenarbeit zwischen den Hochschulen und der Industrie. Dazu gehören auch verschie- dene vom BFE mit finanzierte Projekte. Zu nen- nen sind das Projekt HERCULES [6], in dem die ETHZ und das PSI sowie Wärsilä Schweiz AG Partner sind. Zahlreiche Industriepartner werden im Ende 2008 gestarteten Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselmotoren- verfahren an der Nahtstelle zur Abgasnachbe- handlung* [7] involviert sein. Dazu werden Duap AG, Kistler Instrumente AG, Iveco Motorenfor- schungs AG, Liebherr Machines Bulle SA und Hug Engineering AG gehören. Das Projekt *Erwei-*

terung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe [5] ist Teil des vom Swiss Competence Centre Energy und Mobility (CEEM) geführten Projekts Clean Efficient Large Diesel Engine (CELaDE) [16] in dem eine Zusammenarbeit zwischen der ETHZ, dem PSI und der Empa erfolgt. Das an der Fachhochschule Nordwestschweiz bearbeitete

Projekt *Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT)* [11] 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 mit finanziert.

Internationale Zusammenarbeit

Aufgrund des hohen Niveaus der Verbrennungsforschung in den wichtigen Industrienationen ist die Orientierung an den internationalen Zielen und Ergebnissen sowie die Zusammenarbeit mit Forschungsinstitutionen und Industriepartnern aus anderen Ländern notwendig. In vielen vom BFE unterstützten Projekten erfolgt eine intensive Vernetzung von europäischen Hochschulen und Industriepartnern. Dazu gehört das von der EU mit finanzierte Projekt HERCULES [6]: 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. Erfreulich ist, dass die Arbeiten im 7. EU-Forschungsrahmenprogramm fortgesetzt werden können.

Das Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* [9] war Teil einer internationalen Ausschreibung der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [10]. 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.

Ein wichtiger Informationsaustausch und die Gelegenheit, die Schwerpunkte der Verbrennungsforschung international mitzugestalten, erfolgt in der Mitarbeit in Arbeitsgruppen der Internationalen Energieagentur (IEA) [17]. Für die Verbrennung relevant sind das Implementing Agreement (IA) *Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion* (IEA Combustion) [18] und die *Working Party for Fossil Fuels* (WPPF) [19], in

denen das BFE vertreten ist. Auch das Implementing Agreement *Advanced Motor Fuels* [20] hat eine wichtige Bedeutung für die Verbrennungsforschung. Ein Schweizer Vertreter ist auch hier im Auftrag des BFE in diesem Agreement engagiert. Es findet ein regelmässiger Informationsaustausch statt.

Ziel des IEA IA Combustion ist es, die Entwicklung von Verbrennungstechnologien, die einen verminderten Treibstoffverbrauch und geringere Partikelemissionen aufweisen, für industrielle Anwendungen voranzutreiben. Die Forschungsschwerpunkte umfassen: (1) Die Verbesserung der Effizienz und der Treibstoffflexibilität von Verbrennungsmotoren für Autos und Lastwagen; (2) Die Reduktion des Luftüberschusses in Feuerungen zur Erhöhung des Wirkungsgrads bei minimalen Emissionen; (3) Kontrollmechanismen der Treibstoffeinspritzung und Gemischbildung sowie der Entstehung der Emissionen in Brennkammern von Gasturbinen und (4) Untersuchungen von grundlegenden physikalischen Phänomenen im Verbrennungsprozess. Als eine der Haupterfolge ist die Entwicklung von robusten diagnostischen Fähigkeiten zu werten, wie z.B. Laser induced fluorescence, verbesserte Computational fluid dynamics und Chemical kinetics codes. Die Forschungsthemen werden in sogenannten Collaborative tasks bearbeitet. Aktuell werden in vier Tasks die Themen Hydrogen Internal Combustion Engines, Homogeneous Charge Compression Ignition, Gas Turbines und Nanoparticle Diagnostics bearbeitet. Weitere Collaborative Tasks wie Particulate Diagnostics und Soot Formation sollen 2009 hinzu kommen. Des weitern soll ein Task mit dem Titel «Synthetic and Renewable Fuels in Combustion» eventuell in Zusammenarbeit mit dem Advanced Motor Fuels Agreement der IEA initiiert werden. Aktive Beteiligung der Schweiz im IA Combustion ist momentan lediglich bei den Gasturbinen vorhanden. Eine Mitgliedschaft beim neu zu implementierenden Task Synthetic and Renewable Fuels wird geprüft. 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 der Informationen über internationale Aktivitäten an Interessierte in der Schweiz. Im Jahr 2008 verzeichnete das IA 13 Mitgliedsländer mit Südkorea als neuestes Mitglied.

Die WPPF der IEA [19] leitet unter anderem die Implementing Agreements *Greenhouse Gas R&D Programme*, *Enhanced Oil Recovery* und das *IEA Clean Coal Centre* und richtet ihre Berichte und Empfehlungen an das IEA Governing Board. Im Berichtsjahr wurde die Ausdehnung der Aktivitäten der WPPF fortgesetzt und mit den G8+5-Staaten Südafrika, Indien, China, Mexiko und Brasilien der Informationsaustausch verstärkt. Die im Vergleich zu den Vorjahren sehr hohen Preise für fossile Energieträger waren Teil der Diskussion über die wirtschaftliche Gewinnung von erheblichen zusätzlichen Vorkommen. Die Bedeutung der Reduktion der CO₂-Emissionen hat deshalb

noch zugenommen. Als Massnahmen sollen Wirkungsgradverbesserungen in der Energieumwandlung und Eliminationsverfahren (Carbon Capture and Storage, CCS) an den Förderstellen und bei grossen Kraftwerken angegangen werden. Die Effizienz von Kohlekraftwerken wurde beispielsweise in China bereits an verschiedenen Anlagen verbessert und neue Kraftwerke sollen mit hohem technischem Standard gebaut werden. In Indien hat vor allem die Industrialisierung Priorität. Interessant sind die Ergebnisse eines Programms zur betrieblichen Optimierung von Kraftwerken im asiatischen Raum. Es wurde festgestellt, dass die Anlagen in der Regel mit einem deutlich tieferen Wirkungsgrad laufen, als bei der Inbetriebnahme. Beispiele zeigen, dass mit der Nachjustierung der Anlagen und der Durchführung der ordentlichen Wartungsarbeiten der Wirkungsgrad von 24 % wiederum auf den Nennwert von 32 % angehoben werden konnte.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Rückblick

Erfreulich sind die Erfolge des in internationaler Zusammenarbeit in der Schweiz realisierten und im Berichtsjahr abgeschlossenen Teils des Projekts *HERCULES* [6]. Die Konzipierung und der Bau eines Versuchszylinders für grosse Dieselmotoren konnte erfolgreich umgesetzt werden. Es wurden bereits über 3000 Zündungen durchgeführt, womit die Praxistauglichkeit nachgewiesen wurde. Die Versuchsanlage wird einen substantiellen Beitrag an die Erreichung der Ziele des EU-Forschungsprojekts – die Erhöhung des Wirkungsgrads und die Reduktion der Schadstoffemissionen von Schiffdieselmotoren – leisten können. Diese Ziele decken sich mit den Vorgaben des BFE-Programms Verbrennung. Im ebenfalls abgeschlossenen Projekt *Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures* [4] konnten neue Erkenntnisse über die Russbildung in Dieselmotoren in Abhängigkeit der Drücke gefunden werden. Weiterführende Arbeiten sind noch notwendig.

Im organisatorischen Bereich ist die Neugestaltung der Subsite Verbrennung auf der Website des BFE sowie die Erarbeitung des Detailkonzepts für das Forschungsprogramm Verbrennung zu nennen. Zudem wurden die Kontakte zur Industrie verstärkt.

Ausblick

Gegen Ende 2008 wurden drei neue, grössere Projekte gestartet, die zur Erreichung der For-

schungsziele 2008–2011 beitragen werden. 2009 sollen weitere hinzu kommen, welche die Forschungsschwerpunkte biogene Treibstoffe sowie kleine Motoren für die dezentrale Energieversorgung und den Antrieb von Wärmepumpen abdecken. Ein Projekt, das die bisher in diversen vom BFE geförderten *Lattice Boltzmann Berechnungsmethoden* [21] weiter entwickeln soll, ist zudem in Vorbereitung. Der Schwerpunkt dieser Arbeiten wird die Berechnung von Strömungen in Mikrokanälen sein. Eine Zusammenarbeit mit dem Forschungsprogramm Brennstoffzellen ist vorgesehen.

Die nationale Zusammenarbeit soll weiter gestärkt werden. Vorgesehen sind eine weitere Auflage der Tagung über die Verbrennungsforschung in der Schweiz sowie die Präsentation der Forschungsschwerpunkte des BFE im Rahmen der Hochschulkompetenzgruppe Verbrennung [12], an einzelnen Fachhochschulen und bei diversen Industrieunternehmen. Die Präsenz in den Medien soll erhöht werden. Die Verbesserung der Übersicht über die Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung soll zudem aktiv weiter entwickelt werden. Innerhalb der Forschungsprogramme des BFE soll die Verbrennung als Querschnittstechnologie stärker verankert werden. Dies wird durch Information und Kooperation mit den direkt betroffenen Programmen erfolgen.

Auf internationaler Ebene soll der Inhalt von Collaborative Tasks im Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction

in Combustion der IEA [18] mitgestaltet und die Teilnahme von Schweizer Forschenden gefördert werden. Die Kontakte zu weiteren Forschungsgremien wie die FVV [10], die europäischen Sektionen des Combustion Institutes oder der Deut-

schen Vereinigung für Verbrennungsforschung sollen geknüpft oder verstärkt werden. Der Überblick über den internationalen Stand der Verbrennungsforschung soll erweitert werden.

Liste der F+E-Projekte + Referenzen

- [1] Konzept der Energieforschung des Bundes 2008–2011, http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/index.html?lang=de&dossier_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] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al., PSI-Villigen: Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressure (SB Projekt 100863).
- [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] K. Hermann (kai.hermann@wartsila.com), LAV/ETH-Zürich: HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber (SB Projekt 100706).
- [7] 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).
- [8] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. 12th ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles.
- [9] B. Schneider, K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse (JB Projekt 101514).
- [10] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen FVV; <http://www.fvv.de>.
- [11] T. Griffin (timothy.griffin@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institute für Thermo und Fluid-Engineering: Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT) (Projekt 102860).
- [12] Hochschulkompetenzgruppe Verbrennungsmotoren c/o J. Czerwinski, Abgasprüfstelle und Motorenlabor (AFHB), Hochschule für Technik und Informatik HTI, Biel (Jan.Czerwinski@bfh.ch).
- [13] SVV Schweizerischen Vereinigung für Verbrennungsforschung, LAV ETHZ <http://www.lav.ethz.ch>.
- [14] ERCOCTAC European Research Community on Fluids, Turbulence and Combustion, Coordination Centre Fluid Mechanics Laboratory, EPF Lausanne <http://www.ercocfac.org>.
- [15] PSI 7. International Workshop on Catalytic Combustion <http://iwcc7.web.psi.ch/>.
- [16] Competence Center Energy and Mobility (<http://ccem-ch.web.psi.ch/>) Clean Efficient Large Diesel Engine http://ccem-ch.web.psi.ch/documents/CELaDE_webpubdate.pdf.
- [17] International Energy Agency (IEA) <http://www.iea.org>.
- [18] International Energy Agency (IEA) Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion <http://ieacombustion.com/default.aspx/>.
- [19] WPPF Working Party for Fossil Fuels der IEA <http://www.iea.org>.
- [20] International Energy Agency (IEA), Implementing Agreement on Advanced Motor Fuels <http://www.iea-amf.vtt.fi/>.
- [21] V. Karlin (karlin@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Lattice Boltzmann Simulationen für chemisch reaktive Systeme im Microbereich (SB Projekt 100862).

Impressum

Juni 2009
 Bundesamt für Energie BFE
 CH-3003 Bern
 Druck: Ackermann Druck AG, Bern-Liebefeld
 Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter

Stephan Renz
 Beratung Thoma & Renz
 Elisabethenstrasse 44
 Postfach
 CH-4010 Basel
renz.btr@swissonline.ch

Bereichsleiterin

Dr. Sandra Hermle
 Bundesamt für Energie BFE
 CH-3003 Bern
sandra.hermle@bfe.admin.ch