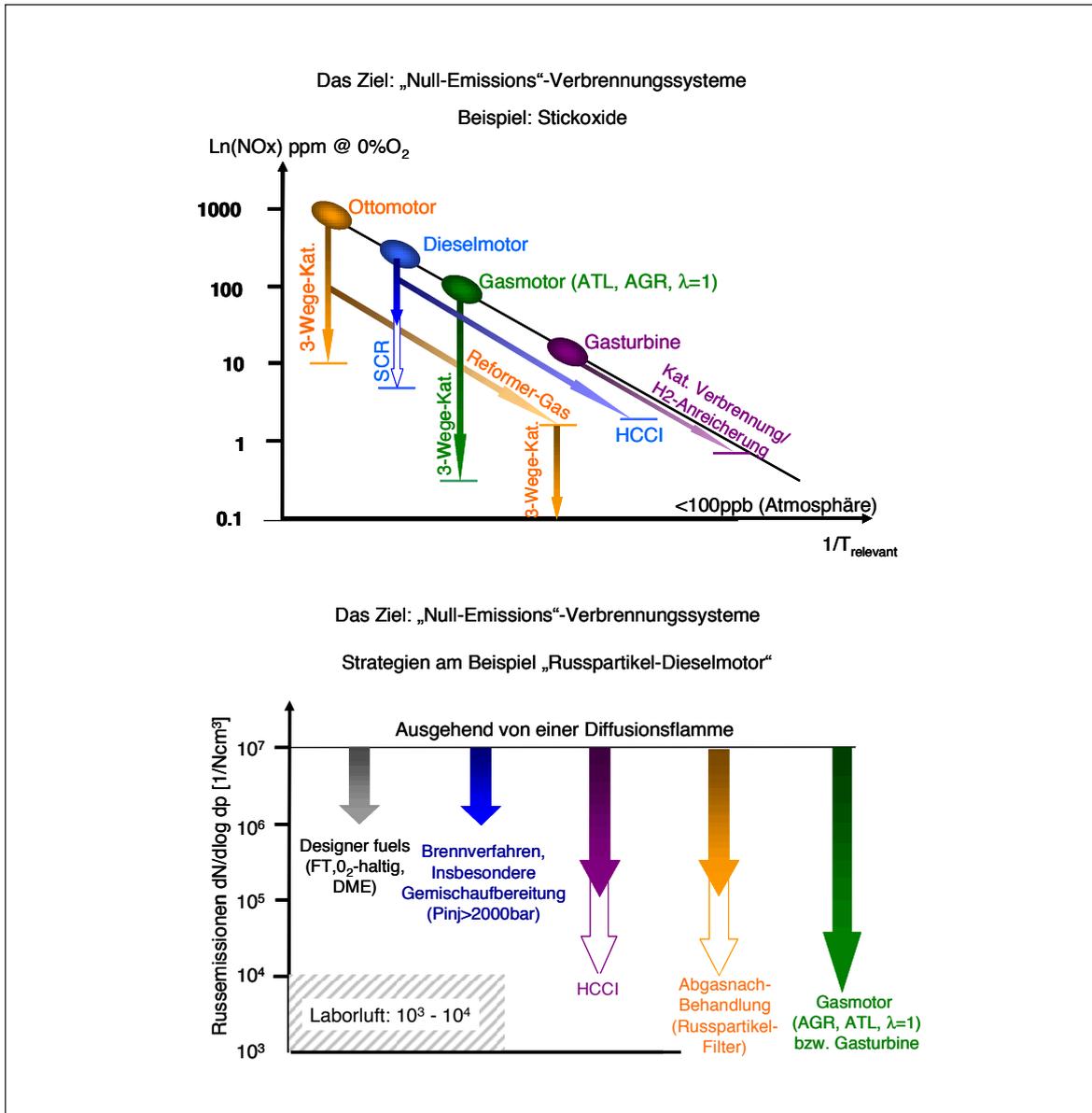


# FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Alphons Hintermann

[alphons.hintermann@bfe.admin.ch](mailto:alphons.hintermann@bfe.admin.ch)



## Das Potential moderner Verbrennungstechnologien ist noch lange nicht ausgeschöpft

Die Zukunft der Verbrennungstechnologien heisst *Null-Schadstoff-Emissionssysteme*. Das Bild oben zeigt die heute möglichen Absenkpfade der  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Das Bild unten zeigt Absenkpfade für Dieselmotoren, für welche die Russemissionen aus dem Auspuff geringer sind als der Russgehalt der Umgebungsluft (Quelle: K. Boulouchos, ETHZ). Ein Teil dieser Absenkpfade ist schon heute in Prototypen realisiert und wird in absehbarer Zeit Stand der Technik sein.

## Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Fossile Energieträger werden noch lange einen Grossteil unseres Energiebedarfs abdecken. Sie werden jedoch in absehbarer Zukunft in zunehmendem Masse durch Biomasse, synthetische Brennstoffe (Designer Fuels) und Wasserstoff abgelöst werden. Hingegen wird die Verbrennungstechnologie auch für diese Brennstoffe noch lange die dominante Konkurrenz zur Brennstoffzellentechnologie im Energiewandlungsprozess bleiben. Auch für ein künftig geändertes Brennstoffspektrum werden Effizienzsteigerung und Schadstoffminimierung die zentralen Ziele der Verbrennungsforschung sein und dieselben Absempfade (siehe Titelbild) gültig bleiben.

Das Programm *Verbrennung* leistet seit 1988 Beiträge zur **simultanen Verbesserung der Energieeffizienz technischer Verbrennungssysteme sowie zur Reduktion derer Emissionen**. Mit diesen Zielsetzungen und dank kontinuierlicher Unterstützung durch das BFE konnten an verschiedenen Hochschulinstituten die Grundlagen moderner Verbrennungstechnologien sukzessive erarbeitet, verstanden und mit einiger Zeitverzögerung mit unterschiedlichem Erfolg in käufliche Produkte umgesetzt werden. Die seit Beginn des Programms definierte **Fokussierung der Forschung auf experimentelle Messtechnik, numerische Simulation und Schadstoff-**

**reduktion mit optimaler Energieeffizienz** hat sich bewährt und bildet den Schlüssel zur Optimierung der Verbrennungstechnologien auch bei geändertem Brennstoffspektrum.

Ein wichtiges Element im Jahr 2004 bestand darin, aufbauend auf dem **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007** [42], ein Forschungskonzept für das Programm *Verbrennung* für dieselbe Periode der CORE vorzustellen. Die generellen **Ziele** im Programm **Verbrennung 2004 – 2007** [43] entsprachen auch den Zielen für das Berichtsjahr:

- Sicherstellung der Qualität und Kontinuität in Forschung und Entwicklung,
- Ausbildung von Ingenieuren in den Verbrennungstechnologiebereichen,
- verstärkte Umsetzung der Forschungsergebnisse mit neuen und bestehenden Industriepartnern,
- Vernetzung der Kompetenzen und Umsetzung des vorhandenen Fachwissens mit Industriepartnern aus der Motoren-, Brenner- und Gasturbinenbranche in marktfähige Produkte,
- bessere Vernetzung der Aktivitäten der ETH Zürich, PSI und EMPA mit den Fachhochschulen
- Verstärkung der Kommunikation des Programms nach aussen.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

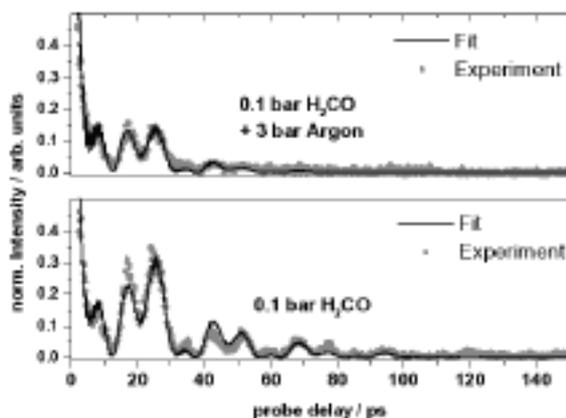
### OPTISCHE MESSMETHODEN

Optische Messmethoden haben eine Schlüsselrolle bei der Untersuchung der Grundlagen reaktionskinetischer Verbrennungs-Phänomene und der Validierung von numerisch modellierten Verbrennungsprozessen. Beispielsweise zeigen OH-PLIF-Messungen, dass die Flammenposition nicht vom Druck in der Brennkammer von Gasturbinen abhängt, obwohl nach chemisch-kinetischen Gesichtspunkten der Gesamt-Reaktionsumsatz – und damit die Flammengeschwindigkeit – mit höherem Druck reduziert werden müsste. Die gewonnenen Resultate lassen sich als Druckunabhängigkeit der turbulenten Flammengeschwindigkeit interpretieren und haben damit wesentliche Implikationen für die zukünftige Auslegung von Gasturbinen-Brennern und –Brennkammern, die bei noch höherem Druck (> 30 bar) betrieben werden sollen, als dies heute üblicherweise der Fall ist. Im opti-

malen Zünden von Verbrennungsgemischen liegt ein wesentliches Potential zur Effizienzsteigerung der Verbrennung und zur Senkung der Emissionen, sowohl bei der motorischen Verbrennung als auch bei der Verbrennung in Gasturbinen. Daher ist es wichtig, die bei der Zündung ablaufenden Prozesse sowohl theoretisch als auch experimentell sehr genau zu analysieren.

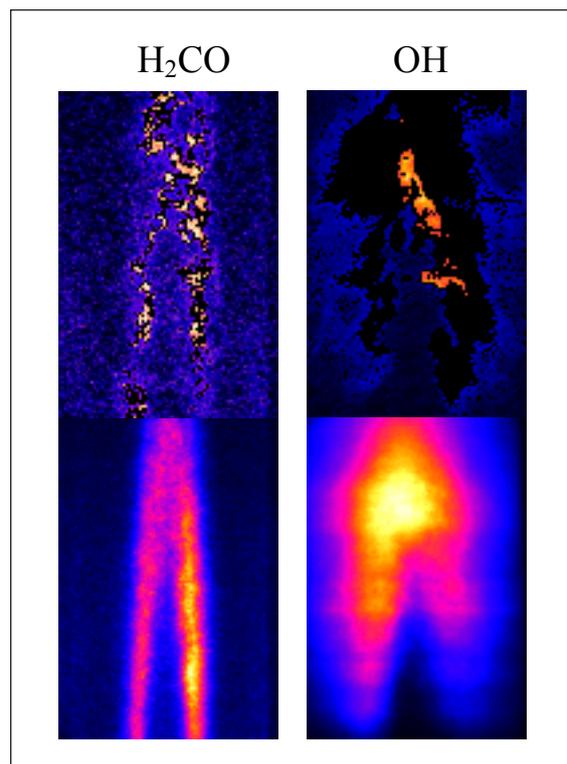
Die PSI-Gruppe *Reaktionsanalyse* untersucht seit einigen Jahren die Reaktionskonstanten von Formaldehyd, einem wichtigen Zwischenprodukt in Flammen. Sie hat mit BFE-Mitteln die dazu notwendigen spektroskopischen Methoden entwickelt. Mit zwei vom SNF finanzierten Doktoranden [27, 28] werden diese Arbeiten fortgeführt. Neben Formaldehyd spielen Peroxylradikale eine wesentliche Rolle beim Zünden brennbarer Gemische. Im neuen Projekt **Investigation of reactions and species dominating low tem-**

**perature combustion** [1] bildet die Rolle dieser Radikale in einer kalten Flamme ( $< 1000^\circ \text{K}$ ) den Fokus. Peroxyle bestimmen das Zündverhalten und beeinflussen die Spezies-Verteilung der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung der weiteren Reaktionspfade. Für die Darstellung von Peroxyen müssen die Laborinstrumente mit geeigneten Radikal-Quellen ausgerüstet werden. Diese Aufgabe ist nicht theoretisch, sondern nur im Experiment lösbar. Deshalb wurden photolytische und pyrolytische Quellen sowie Entladungsquellen realisiert und getestet. Ein Fit erster Messungen (Fig. 1) für das Referenz-Molekül  $\text{H}_2\text{CO}$  (Formaldehyd), bei dem nur die Vibrations-Zustände mit einem bestimmten physikalischen Modell berücksichtigt wurden, zeigt schon eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und experimenteller Beobachtung. Der zusätzliche Einbezug der Rotations-Zustände ist in Vorbereitung.



**Figur 1:** Transienten von fs-CARS Messungen in  $\text{H}_2\text{CO}$ . (Quelle PSI)

Die PSI-Gruppe *Verbrennungsdiagnostik* befasst sich im Projekt **Quantitative Laser Induced Fluorescence (LIF) in Combustion** [2] mit der Anwendung von LIF sowohl bei Gasturbinen- als auch bei Laborbrennern. Im Berichtsjahr wurden die Grenzen der 2-D-LIF Methode (Fig. 2) für die Radikale CH und  $\text{CH}_2\text{O}$  weiter ausgelotet. Gezeigt wurde, dass die beiden Radikale als Marker für die Flammenfront, zur Bestimmung der Form der Reaktionszone oder zur quantitativen Bestimmung der Wärmefreisetzung in Flammen herangezogen werden können. Diese experimentellen Grundlagen sind von hoher Relevanz im P+D-Projekt [11] und im KTI-Projekt **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brennern** [21].



**Figur 2:** Beispiele von «single pulse»(oben) und «averaged»(unten) LIF-Bildern der transienten Radikale  $\text{H}_2\text{CO}$  und OH in einer turbulenten Vormischflamme. (Quelle PSI).

Eine weitere Projektaufgabe besteht darin, an einem speziellen Laborbrenner Gegenstromflammen von Methan/Luft und Wasserstoff/Luft detailliert experimentell zu untersuchen. Die auch für reale Brenner typischen Verhaltensmuster wie Flammenlöschen/(-wieder)-Zünden und Übergänge zwischen verschiedenen Flammenstrukturen werden an den Modell-Flammen ausgemessen und die zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen untersucht. Numerisch berechnete Voraussagen über lokales Auslösen von Flammen und deren Stabilisierung durch geeignete Massnahmen konnten inzwischen experimentell bestätigt werden. Die sehr enge Zusammenarbeit zwischen den PSI-Experimentatoren und den Modellierern vom LAV der ETH-Zürich ist einer der Erfolgsfaktoren bei dieser Aufgabe [32].

Das im Jahr 2003 abgeschlossene Projekt **Experiment turbulente Gegenstromflamme** hat zu 2 Dissertationen Anlass gegeben, die im Berichtsjahr weitergeführt wurden. Die erarbeiteten Datenbasen stellen eine hervorragende Grundlage für Modell-Validierungen dar. Validierte Rechen-codes gewinnen immer mehr Bedeutung bei Industriepartnern und leisten einen Beitrag zur Kostensenkung bei der Entwicklung effizienter, emissionsarmer Verbrennungstechnologien.

## NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSPROZESSEN

Im interdisziplinären Projekt **Large Eddy-Simulation (LES) in der turbulenten Verbrennung** [3], in dem die vier ETHZ Institute: *Seminar für angewandte Mathematik (SAM)*, *Institut für Fluidodynamik (IFD)*, *Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)* und *Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT)* zuarbeiten, entwickelte das SAM eine neuartige, mehrdimensionale Lagrange-Transportmethode. Diese basiert auf Darstellungen von Strömungselementen als *Langrange'sche Finite Volumina*, die bewegt und deformiert werden. Der LAV- und IFD-Projektteil stand im Zeichen der Grobstruktursimulation eines isothermen, turbulenten Freistrahls mit einer Reynoldszahl von 2000. Zur Berechnung der exakten Geschwindigkeitsstatistiken – einer wichtigen Voraussetzung für das korrekte Verhalten der Strahl-Diffusionsflamme – wurde ein *Inflow-Generator* in den Code eingebaut. Die zusätzliche grosse Sensitivität des Verhaltens des turbulenten Freistrahls auf die Randbedingungen am Mantel der Rechendomaine und die Einführung eines neuen Konzepts der Verbrennungsmodellierung führten jedoch zu Projektverzögerungen. Das in den letzten Jahren am LTNT entwickelte transiente Flamelet-Modell wurde mit einigen Verbesserungen im CFX-Code eingebunden und ist im Vergleich mit der Sandia-D-Flamme [29] getestet worden. Erste Auswertungen zeigen, dass sowohl der Mischungsbruch als auch das Temperaturprofil entlang der Flammenachse viel besser reproduziert werden können als mit den bisherigen Modellen.

Mit der Entwicklung zuverlässiger und genauer Simulationswerkzeuge treibt das LAV die Optimierung von Verbrennungssystemen hinsichtlich des Zielkonflikts Energieeffizienz ( $\text{CO}_2$ -Reduktion) und Schadstoffemissionen im Projekt **Direkte numerische Simulation (DNS) der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** [4] voran. Die DNS ist eine leistungsfähige Methode für die detaillierte Analyse von Verbrennungsprozessen. Der am LAV entwickelte parallele, dreidimensionale DNS Code basiert auf der Methode der spektralen Elemente, welche die geometrische Flexibilität eines Finite-Elemente-Ansatzes mit der Genauigkeit der spektralen Methode vereinigt und insbesondere für die Simulation geometrisch komplexer Anordnungen geeignet ist. Die Chemie und die Transportprozesse sind zurzeit durch vereinfachte Modelle beschrieben. Der Code wird für die Untersuchung von laminaren und transitionalen Verbrennungsprozessen angewendet. Basierend auf diesem Code wurde auch der Ansatz der Large

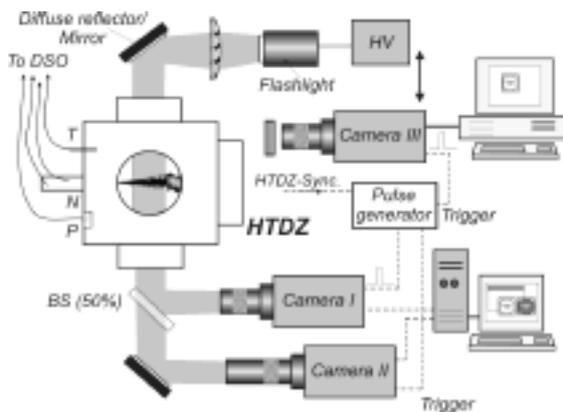
Eddy Simulation (LES) zur Berechnung turbulenter Verbrennungsvorgänge implementiert. Die perfekte Skalierbarkeit des parallelen Codes erlaubte es, Instabilitäten in Diffusionsflammen nahe der Auslöschung in einem dreidimensionalen Jet zu untersuchen und die zellförmigen Strukturen die experimentell an der ETH-Lausanne beobachtet wurden, zu simulieren. Im Berichtsjahr wurde der Code mit einem parallelen Integrator für steife Differentialgleichungen auf detaillierte Chemie und Transport erweitert und wird zurzeit auf die Simulation pulsierender Diffusionsflammen angewendet.

Im neuen Projekt **Lattice Boltzmann Simulationen für chemisch reaktive Systeme im Mikrobereich** [5] wird eine neue Annäherung für die rechengestützte Strömungsdynamik im Mikrometer-Skalenbereich hergeleitet. Die Lattice Boltzmann Methode ist ein Kompromiss zwischen dem simplifizierten hydrodynamischen und dem rein molekulardynamischen Ansatz und soll den für Mikroreaktoren wichtigen Bereich der Knudsen-Zahl (freie Weglänge/Poren- bzw. Kanaldurchmesser) von 0.1 bis 1 möglichst gut beschreiben.

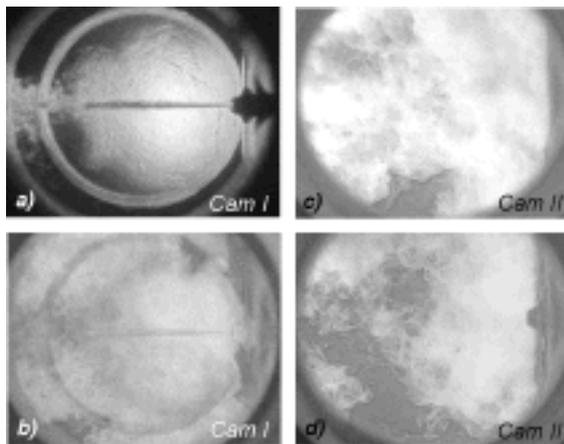
Im Projekt **Weiterentwicklung des Pluto-Brenners** arbeitet das LTNT eng mit der Firma *Toby AG* in Solothurn, zusammen. Der Pluto-Brenner, ein Ölverdampfungsbrenner im Leistungsbereich 5 - 15 kW, mit guten Marktchancen, soll neu als kondensierender Wärmeerzeuger konzipiert werden. Die Brenner-Modellierungserfahrungen des LTNT sind direkt in die Entwicklungsschritte des *Pluto-Brenners* eingeflossen. In einem KTI-Folgeprojekt sollen im Jahr 2005 neue Simulationsrechnungen die notwendigen Schritte in Richtung billigerer Produktion einleiten.

## SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

Die Optimierung der Dieselmotor-Verbrennungsprozesse hinsichtlich Leistung, Abgase und Russ ist ein vordringliches Ziel einer nachhaltigen Mobilität. Ein detailliertes Verständnis der im Motorbrennraum ablaufenden Prozesse kann nicht allein durch Optimierungsprozesse am fertigen Motor, sondern nur durch Untersuchung aller elementaren verbrennungsrelevanten Vorgänge in verschiedenen Phasen des Motorzyklus erreicht werden. Dazu steht am PSI ein in Zusammenarbeit mit dem LAV aufgebauter Prüfstand zur Verfügung, mit dem Sprayflammen vom Beginn der Einspritzung bis zum Ausbilden einer stabilen Flamme untersucht werden können. Das Projekt **Investigation of Spray Combustion in Constant Volume Combustion Cell** [6] wurde im



**Figur 3:** Optische Anordnung zur Aufnahme von Bildserien der Flammen/Russemission während der Sprayverbrennung in der HTDZ. P: Drucksensor, N: Brennstoffdüse, T: Thermoelement, BS: Strahlteiler (50%)



**Figur 4:** Zeitserienbilder der Flammen-Russemission während der Dieselverbrennung in der HTDZ. Triggerzeiten nach Start der Injektion (in ms): 10.8 (Bild a), 16.2 (Bild b), 19 (Bild c), 27.3 (Bild d). Belichtungszeiten: je  $5 \mu\text{s}$  (Bild a, b) bzw.  $2 \mu\text{s}$  (Bild c, d).

Berichtsjahr abgeschlossen und im Folgeprojekt **Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures** [7] konnten durch den Einsatz zweier unabhängig aktivierbarer intensivierter CCD-Kameras mit schneller Bildauslesung 4-Bild-Sequenzen eines einzelnen Einspritz- und Verbrennungsvorganges aufgenommen werden (Fig. 3). Dies erlaubt den flexiblen und kombinierten Einsatz verschiedener Visualisierungsverfahren, wie elastische Lichtstreuung, Schattenabbildung, Chemilumineszenz, laser-induzierte Inkandescenz (LII) bzw. laser-induzierte Fluoreszenz (Fig. 4).

Die für die Auswertung der experimentellen LII-Signale notwendigen Simulationsprogramme sind einsatzbereit. Die Erfahrungen aus dem Betrieb und der Entwicklung optischer Messverfahren an der HTDZ fließen auch in das Mitte 2004 gestartete EU-Projekt **HERCULES** [18] ein und kommen am anwendungsnahen Prüfstand der Firma *Wärtsilä* (Winterthur) zur Untersuchung der Gemischbildung und Verbrennung in Schiffsdieselmotoren zum Einsatz.

Die Einführung der Common-Rail (CR) Einspritztechnologie erweiterte die Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Wärmefreisetzungsrates dramatisch. Innermotorische Massnahmen, welche im direkten Zusammenhang mit der Einspritzung stehen, sind die Optimierung des Einspritzdrucks, des Einspritzzeitpunktes und des Einspritzprofils (durch Mehrfacheinspritzungen) möglich. Speziell zu erwähnen ist die Entkopplung des Einspritzdrucks von der Drehzahl mit der CR-Technologie. In Bezug auf Emissionen sind weitere Massnahmen im Luftpfad zu nennen wie die Abgasrückführung und Ladeluftkühlung sowie eine Optimierung der Kraftstoffzusammensetzung. Generell ist ein Trend absehbar, die Vorteile der Diffusionsverbrennung mit denen der Vormischverbrennung zu kombinieren und gleichzeitig die Nachteile der beiden Brennvorgänge möglichst zu vermeiden. Ein dominantes Problem bei der Diffusionsverbrennung stellt dabei der NO<sub>x</sub>-Russ trade-off dar. Der NO<sub>x</sub>-Ausstoss kann durch eine Senkung der Prozesstemperaturen vermindert werden. Für die Oxidierung von Russ sind jedoch hohe Temperaturen vorteilhaft. Die Kraftstoffkonzentration ist für die Bildung von Russ von entscheidender Bedeutung. Im Projekt **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** [8] werden spezifische Experimente durchgeführt, um die Komplexität des Dieselverbrennungsprozesses besser zu verstehen.

Beim Dieselmotor ist die Gemischbildungsqualität für die homogene Kompressionszündverbrennung magerer Gemische zwecks Erzielen tieferer Stickoxid- und Russemissionen von hoher Wichtigkeit. Im Projekt **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennvorgänge und motorische Arbeits-Prozesse** [9] werden zündfähige, schwerverdampfende Kraftstoffe (meistens Dieseldestillate), die als Flüssigkeit in den Brennraum eingespritzt werden, experimentell und numerisch untersucht. Experimentiert wurde an der Hochdruck-Hochtemperatur Zelle (HDTZ) der ETH Zürich und am Einhubtriebwerk, das seit Herbst 2004 operativ ist. Das angewandte Schlierenverfahren erwies sich als sehr sensitiv und in Kom-

ination mit der Schattenbildtechnik gelang eine qualitative Unterscheidung zwischen der Flüssig- und der Dampfphase. Ergänzende Aufnahmen der passiven OH-Chemilumineszenz erlaubte es, den Entflammungsort und den Zündzeitpunkt festzustellen. Damit wurde eine gute Datenbasis für die Validierung der numerischen Modelle erarbeitet.

Numerische Schwerpunkte sind die Analyse detaillierter Reaktionsmechanismen für Alkane und deren Reduktion auf die wesentlichsten Reaktionen, sowie deren Koppelung mit Mehrzonenmodellen und kompletten 3D-Strömungssimulationen. Gezielt sollen Modelle erstellt werden,

welche die Gemischaufbereitung, die Zündung, die Verbrennung sowie die Schadstoffbildung homogen betriebener kompressionsgezündeten Motoren berechnen. Mit dem Simulations-Ansatz der Reaktionspfadanalyse, der Wärmefreisetzungsanalyse und deren Optimierung mit bio-inspirierten Algorithmen scheint ein Durchbruch bei der Mechanismenreduktion gelungen zu sein. Die Ergebnisse mit dem Vielzonenmodell sind vielversprechend und werden bald bei ausgewählten Betriebspunkten der Projektpartner zur Anwendung gelangen. Das Ziel ist ein effizient einzusetzendes Instrument zur industriellen Entwicklung eines HCCI Motors.

## Nationale Zusammenarbeit

Die zur Realisierung von *Null-Emission*-Verbrennungssystemen notwendige Grundlagenforschung kann nur an Hochschulen erarbeitet werden und wurde langfristig durch BFE-Mittel an der ETH-Zürich im Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) und im Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT) sowie am PSI und an der EMPA gefördert. Die enge Zusammenarbeit dieser Institutionen mit Motorenherstellern in der Schweiz (*Liebherr Machines SA*, *Iveco* und *Wärtsilä NSD*) sowie mit dem Gasturbinenhersteller *ALSTOM POWER* hat Tradition und gewährleistet eine rasche Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis. Nicht zu unterschätzen ist auch die Zusammenarbeit der Hochschulinstitute mit Industriepartnern aus der Zulieferindustrie der Automobilbranche wie *ABB-Turbosystems*, *Kistler*, *Common Rail Technologies*, *Bosch*, u.a. Seit Jahren besteht eine gute Zusammenarbeit der ETH-Zürich und der EMPA mit der Fachhochschule Biel.

Die umsetzungsnahen **KTI-Projekte** profitieren von den BFE-Vorleistungen an den Hochschulen. Das Projekt **Modellierung und Auslegung eines  $\text{CO}_2$  und  $\text{NO}_x$  freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen** [20] wurde anfangs 2004 erfolgreich beendet. Verzögerungen weist das Projekt **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brenner** [21] auf. Die Erkenntnisse dieses Vorhabens sollen der Verbesserung der laufenden Generation von *Alstom*-Gasturbinen dienen. Im Projekt **Grundlagen der  $\text{H}_2$ -Reformat-Zumischung am Ottomotor** [22] erarbeiten die FH-Biel, das LAV und

der Industrie-Partner *Robert Bosch GmbH* Beiträge zur weiteren Absenkung der Emissionen sowie zur Erhöhung des Wirkungsgrades im Teillastbereich. Ziel der Partner LAV und *Kistler AG* im Projekt **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor** [23] ist die Realisierung einer Lichtwellenleiter-Sondenspitze, mit welcher im Brennraum kurbelwinkelaufgelöst gemessen werden kann. Sie soll die Umsetzung neuer Einspritz- und Verbrennungsstrategien in künftigen Motorengeneration ermöglichen, um strengere Emissionsgrenzwerte zu erfüllen. Im Projekt **Simulationswerkzeuge für die Optimierung der Brennverfahrenentwicklung bei Grossdieselmotoren** [24] wird die Kompetenz des LAV im Bereich der 3-D Simulation von Verbrennungssystemen zur Realisierung eines praxistauglichen Werkzeuges für die Vorausberechnung/Auslegung zukünftiger Produkte des Industriepartners *Wärtsilä Winterthur* beitragen.

Die Zusammenarbeit der Hochschulinstitute mit Fachhochschulen konnte im Berichtsjahr durch neue KTI-Projekte intensiviert werden. Die EMPA entwickelt im Projekt **Schaumkeramik für neuartige keramische Porenbrenner** [25] langzeitstabile Materialien, die beim Industriepartner umgesetzt werden sollen. Die FHBB entwickelt im Vorhaben **CATVAP-Burner** [26] neue Katalysatoren für den Einsatz der CATVAP-Technik in Öl- und Gasbrennern, die später vom Industriepartner gefertigt und in seinen Brennern eingesetzt werden sollen. Das umtec der FH-Rapperswil beendete ein vom BUWAL unterstütztes Projekt zum Thema **Stickoxid-Reduktion bei mobilen Dieselmotoren**.

**toren** [19]. Eine vermehrte Zusammenarbeit mit dem PSI ist anzustreben.

Der Vernetzung von Hochschulforschung mit den Fachhochschulen und der Privatwirtschaft diente die Tagung des **Schweizerischen Vereins für**

**Verbrennungsforschung (SVV)** vom Oktober 2004, die unter dem Motto **Anwendungsorientierte Verbrennungs-Forschung in der Schweiz** [30] am **ALSTOM POWER Technology Centre** in Baden Dättwil abgehalten wurde.

## Internationale Zusammenarbeit

Das Jahrestreffen der **European Research Community on Flow Turbulence and Combustion (ERCOFTAC)** und des **Leonhard Euler Kompetenzzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffformation** wurde am 1. Oktober 2004 am **ALSTOM POWER Technology Centre** in Baden Dättwil zum Thema: *Measuring Techniques, Combustion and Pollutant Formation* durchgeführt.

Betreffend Zusammenarbeit innerhalb des IEA-Implementing Agreements **Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion** [www.im.na.cnr.it/IEA/](http://www.im.na.cnr.it/IEA/) wird im Executive Committee die Möglichkeit der Zusammenarbeit in Subtasks ins Auge gefasst. Diesbezügliche Untergruppen treffen sich seit einiger Zeit, um gemeinsame Ziele und Aufgaben zu diskutieren. Eine Beteiligung der Forschungsgruppen des PSI und der ETHZ ist vorgesehen. Das jährliche *Task Leaders Meeting*, das im August 2004 in Helsinki durchgeführt wurde [31], bot Schweizer Forschern die Gelegenheit, ihre bestehenden Kontakte, u.a. mit dem *Sandia National Laboratory* (USA), dem *National Research Council* (Kanada) und insbesondere mit den anwesenden Japanern zu pflegen und sich in die Untergruppen einzubringen.

Mit über 1200 Teilnehmern, rund 300 Vorträgen und 480 *Work in progress*-Postern war das **30<sup>th</sup> International Combustion Symposium 2004** in Chicago das herausragende Ereignis des Jahres. Mit je vier Vorträgen [32- 35] und Postern [36- 39] war die Schweiz gut vertreten.

Weiter zunehmend ist die Teilnehmerzahl der seit 1997 jährlich an der ETHZ abgehaltenen, u.a. vom BFE und BUWAL unterstützten Nanopartikel-Konferenz. Organisatoren sind das LAV/ETHZ, die FH-Aargau und die Firma *TTM* (Niederrohrdorf). Etwa 250 Teilnehmer (neuer Rekord!) aus Europa, Nordamerika, dem fernen Osten und Australien nahmen im August 2004 an der Konferenz teil, um Erfahrungen und neues Wissen zu Russpartikeln aus der dieselmotorischen Verbrennung auszutauschen. Das BUWAL finanzierte die CD-

Rom [40] mit den *Proceedings* und weiteren Informationen.

Die Ergebnisse des Projekts **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** [9] fliessen weiterhin in das internationale Forschungsprojekt **Homogene Dieselverbrennung** der deutschen *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen* ein. Diese Forschungsvereinigung finanziert das LAV zusätzlich zum BFE.

Im EU-Projekt **HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships)** innerhalb des 6. Rahmenprogramms werden neue Technologien in Bezug auf Schiffsmotoren entwickelt. Schweizer Partner sind *Wärtsilä/CH*, *ABB Turbosystems*, das LAV, das PSI und die EMPA. Das LAV befasst sich mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für dessen Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Mit Unterstützung des LAV und des PSI wird bei *Wärtsilä Schweiz* ein Versuchsstand aufgebaut, mit welchem relevante Bedingungen des Verbrennungssystems grosser Zweitakt-Schiffsdieselmotoren experimentell realisiert werden können. Kernstück der Anlage ist eine Spray/Verbrennungskammer mit äusserst flexibler optischer Zugänglichkeit, variablen realistischen Strömungsbedingungen und einem realen Einspritzsystem, dessen konstruktive Auslegung heute vorliegt. Zusammen mit *Wärtsilä* konnten anhand von numerischen Simulationen die analytischen Auslegungsberechnungen und die konstruktiven Anforderungen im Detail überprüft werden.

Die erwähnten Institutionen im ETH-Bereich arbeiten intensiv mit ausländischen Unternehmen zusammen. Es bestehen gemeinsame Projekte mit *GM*, *VW*, *Opel*, *Renault*, *ALV*, *Iveco* und der *Forschungs-Vereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.* in Deutschland.

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Erkenntnisse aus dem abgeschlossenen Projekt **Demonstration eines optischen Sensors zur Unterstützung der Entwicklung von schadstoffarmen motorischen Verbrennungssystemen** [10] haben starkes Interesse seitens der Industrie ausgelöst. Die miniaturisierte Messsonde soll auch an kleinen Motoren minimalinvasive, optische Messungen ermöglichen.

Eine der grössten Herausforderungen für die weltweite Verbrennungsforschung auf dem Gebiet der turbulenten Vormischflammen ist das Verständnis und die quantitative Beschreibung der Turbulenz-Chemie-Wechselwirkung. Dazu ist im Projekt **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten vorgemischten Hochdruckflammen** [11] vor allem die Interaktion von Turbulenz und chemischer Reaktion bei den spezifischen Betriebsbedingungen einer stationären Gasturbinenbrennkammer von Interesse. Die Projektziele 2004: Bestimmung der turbulenten Flammengeschwindigkeit anhand der statistischen Auswertung von OH-PLIF Messungen und die Durchführung von  $H_2CO$ -PLIF Messungen bei  $CH_4$ /Luft-Hochdruckflammen, sowie erste Messungen zur Bestimmung der mageren Löschgrenzen bei  $CH_4/H_2$ /Luft-Gemischen sind erreicht worden. Der Einfluss der Turbulenz auf die Flammenfront (Position, Struktur) und die  $NO_x$ -Emissionen wurden detailliert untersucht (Fig. 5).

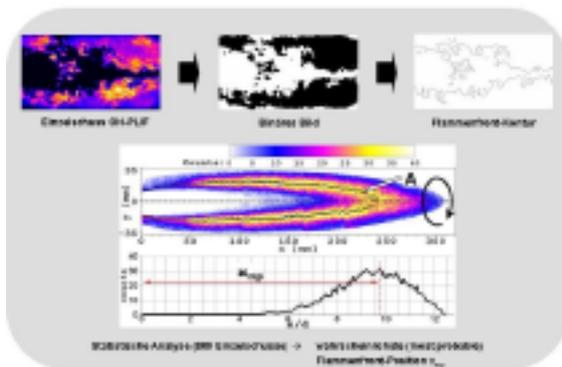
Diese experimentellen Daten sind für die Validierung numerischer Flammenmodelle, die künftig zur Auslegung industrieller Gasturbinen mit höherem Gesamtwirkungsgrad und tieferen Emissionen eingesetzt werden sollen, von grosser Bedeutung.

Die Ergebnisse des abgeschlossenen Projekts  **$NO_x$ -Verminderung bei mobilen Dieselmotoren**

**ren mittels Harnstoff-SCR** [17] sind weiterhin aktuell und werden zur Zeit mit PSI-eigenen Mitteln weitergeführt.

Die Arbeiten im Projekt **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem  $CO_2$ -Ausstoss** [12] umfassten im Jahr 2004 die Konstruktion der internen Gas Entnahme-Sonde (IGE-Sonde). Die Auslegungsparameter für die IGE-Sonde wurden so erarbeitet, dass die Probleme bei der Inbetriebnahme möglichst minimiert werden. Das Verhalten der Gase während einer Entnahme mit der IGE-Sonde wurde mittels 3-D Rechnung (StarCD) simuliert, daraus Optimierungspfade abgeleitet und nach Möglichkeit genutzt. Da **LIEBHERR** mit der Lieferung des D934 Direct Injection-Dieselmotors mit Vierventiltechnik in Verzug war, konnte das erstellte und getestete 3-D Simulationsmodell noch nicht validiert werden. Sobald dies erfolgt ist, soll eine Bestandesaufnahme gemacht werden, welche das Potential des für die *Tier 3* Abgasnorm zertifizierten Motors bezüglich der kommenden Norm *Tier 4* darstellen soll. Dabei sollen Variationen von PLD-Parametern, und evtl. Aufladung und Verdichtung untersucht werden. Im Bereich der Messtechnik und Abgasanalytik wird eng mit der EMPA zusammengearbeitet.

Als Vorbereitung einer zukünftigen Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie auf dem Gebiet reduzierter  $CO_2$ -Emissionen im Teillastbereich war das Projekt **Massnahmen zur Reduktion der  $CO_2$ -Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** [13] vorgesehen. Die ursprüngliche Idee war, ein erstes Konzept eines neuen verbrennungsmotorischen Ansatzes rechnerisch auszuarbeiten. In der Folge wurden intensive Kontakte mit einer Firma in Deutschland geknüpft und nach langem Austausch ein Konzept definiert. Dabei zeigte sich aber, dass den Industriepartnern eine reinere Konstruktionsarbeit an der ETH vorschwebte und die finanziellen Mittel dazu ungenügend waren. Gleichzeitig verlagerte sich das Interesse für die Analyse und Optimierung zukünftiger Antriebssysteme in Richtung der Berücksichtigung von Kraftstoff-Reformern, Abgasnachbehandlungs-Systemen und optimierten elektrischen Unterstützungssystemen. Daher wurde das Projekt neu mit Schwerpunkt auf die Entwicklung einer schnellen Software ausgerichtet, die zur Weiterentwicklung der thermochemischen (z. T. elektrischen) Analyse von Antriebstechnologien dient, und soll im Jahr 2005



**Figur 5:** Methode zur Bestimmung der wahrscheinlichen Flammenfront-Position und Flammenoberfläche.

abgeschlossen werden. Dieser Software kommt die LAV-Grundlagenexpertise für Verbrennungssysteme (inkl. Microflows) und Reaktoren zugute. Sie ermöglicht nach ihrer Fertigstellung, sowohl zukünftige Technologien durch eine sehr effiziente Simulation zu beurteilen, als auch die Optimierung im Teillastbereich mit besseren Realisierungschancen durchzuführen.

Das Projekt **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner** [14] soll wichtige Beiträge zur Optimierung der mageren Vormischverbrennung für stationäre Gasturbinen liefern. Ziel ist die Weiterentwicklung des am LTNT vorhandenen instationären Flamelet-Modells, um den für Gasturbinen interessanten Bereich zwischen Diffusions- und teilvorgemischter Verbrennung besser zu simulieren und es als Entwicklungstool für den Industriepartner *Alstom Power* auszugestalten. Am Flameletmodell sind verschiedene Verbesserungen durchgeführt worden. Es wurde in ein neues CFD-Paket integriert, um mit unstrukturierten Gittern zu arbeiten. Mit einem neuen Ansatz soll die turbulente Zeitkonstante des Modells besser berechnet werden. Die Validierung des Modells ist in Vorbereitung und für 2005 ist ein halbjähriger Aufenthalt eines Doktoranden bei *Alstom Power* geplant, um das Modell dort zu implementieren. Die gewonnenen Erkenntnisse werden direkt in die Entwicklung der nächsten Generation von schadstoffarmen Gasturbinen einfließen.

Im Projekt **Partial Catalytic Oxidation of CH<sub>4</sub> to Synthesis Gas for Power Generation Application** [15] wird den Entwicklungstrends nachgegangen, mittels neuer Brennverfahren noch geringere Emissionen ( $\text{NO}_x < 10\text{ppm}$ ) und höhere Wirkungsgrade ( $\eta > 60\%$ ) zu erreichen. Vielversprechende Alternativen stellen katalytisch unterstützte Verbrennungsverfahren dar, die auf grundsätzlich neuen Brennstoff-Umwandlungsverfahren basieren. Die partielle katalytische Oxidation von CH<sub>4</sub> zu Synthesegas (CO und H<sub>2</sub>) wurde experimentell und numerisch untersucht. In einem optisch zugänglichen Reaktor [41] sind die durch Abgasrückführung (AGR) stark verdünnten Gemische (bis zu 60% H<sub>2</sub>O und 40% CO<sub>2</sub> vol.) bei 4 bis 10 bar über einem Rh/ZrO<sub>2</sub> Katalysator umgesetzt worden. Die Experimente beinhalteten in situ Raman Messungen der Konzentrationen der Hauptspezies zur Untersuchung der heterogenen Prozesse sowie planare Messungen mit Laser Induzierter Fluoreszenz von Formaldehyd (CH<sub>2</sub>O) zur Bestimmung der Gasphasen-Verbrennung. Sowohl die Raman-Messungen als auch die numerischen Berechnungen haben die Bedeutung des heterogen katalysierten Steamreformings von

Methan belegt. Es erhöht die Wasserstoff-Selektivität und die Synthesegas-Ausbeute. Darüber hinaus haben die LIF Experimente deutlich den Einfluss der Gasphase bei höherem Druck belegt, trotz der hemmenden Wirkung der grossen Wasserdampf-Verdünnung. Zusätzliche Experimente wurden in einem kleinmassstäbigen Honigwaben-Katalysator (Fig. 6) mit der gleichen Rh/ZrO<sub>2</sub> Beschichtung wie im optisch zugänglichen Reaktor durchgeführt.

Eine Auswahl verschiedener Rhodium basierter Katalysatoren wurde bei grosser AGR auf Eignung getestet. Als am besten für partielle katalytische Oxidation geeignet haben sich Rh/ZrO<sub>2</sub> und Rh/Ce-ZrO<sub>2</sub> herausgestellt. Mit diesen Katalysatoren wurden Wasserstoffausbeuten von bis zu 35% vol. und Zündtemperaturen von bis auf 655° K hinunter mit CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> Gemischen erreicht. Mit dieser Fachkompetenz nimmt das PSI zusammen mit 10 europäischen Partnern am **EU-Projekt Advanced Zero Emission Power** teil.



**Figur 6:** Für PCO Experimente verwendete Honigwaben strukturierte FeCr-Legierung

Im Projekt **Umwandlungseffizienz von Brennstoffzellen und Verbrennungskraftmaschinen für die stationäre, dezentrale Energieversorgung** [16] ist eine Literaturrecherche zu verschiedenen Typen von Brennstoffzellen aufgrund neuester publizierter Daten und Konferenzen durchgeführt und mit sowohl mit berechneten Werten als auch mit Erfahrungswerten für Verbrennungskraftmaschinen verglichen worden. Berücksichtigt wurden einerseits stationäre Anlagen zur kombinierten Strom-/Wärmeerzeugung und andererseits instationäre PKW-Antriebe (wobei bei verbrennungsmotorischen Antriebssträngen auch Hybridkonzepte einbezogen wurden). Die Studie soll Anfang 2005 mit Angaben zu Bauvolumen, Gewicht und Kosten (soweit verfügbar) ergänzt und abgeschlossen werden.

## Bewertung 2004 und Ausblick 2005

In den beschriebenen Projekten haben die Forscher und ihre Kooperationspartner sehr gute Arbeit geleistet und ihre Fachkompetenz national wie auch international unter Beweis gestellt. Die Qualität und Kontinuität in den Projekten konnte wie bisher aufrechterhalten werden. Dank erfolgreich eingereicherter KTI- und EU-Projekte konnte der verfügte Stopp für neue P+D-Projekte teilweise aufgefangen und die Umsetzung der Forschungsergebnisse mit Partnern aus der Industrie gewährleistet werden. Generell kann festgestellt werden, dass sich die Investitionen der letzten fünfzehn Jahren in die Grundlagenforschung gelohnt haben. Die Verbrennungsmodellierung genießt heute in der Privatwirtschaft eine viel stärkere Akzeptanz und wird vermehrt als modernes und kostensenkendes Werkzeug in der Entwicklung verbesserter Technologien von Industriepartnern eingesetzt.

Die Früchte der langjährigen, BFE-unterstützten Forschung über die Harnstoff-Entstickung der Dieselmotorenabgase am PSI können heute genannt werden: Die Ergebnisse des abgeschlossenen Projekts ***NO<sub>x</sub>-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR*** [17] sind erfolgreich demonstriert und topaktuell. Die SCR-Methode ist heute in der Umsetzungsphase bei den grossen Dieselmotorenanbietern. Die Zusammenarbeit des PSI mit dem IMRT der ETH-Zürich wurde unter dem Titel *Mobil-SCR* in einer MTW-Sendung präsentiert. Die Crew hat sich damit auch um den *Swiss Technology Award 2005* beworben.

Erfreulich ist die internationale Akzeptanz der Schweizer Forschungsbeiträge. Von acht eingereichten Beiträgen [32 - 39] für das alle 2 Jahre stattfindende *Combustion Symposium* wurden vom *Scientific Committee* deren vier als mündliche Vorträge akzeptiert und die andern in die Poster Session verwiesen.

Der langjährige Prozess, die Fachhochschulen untereinander und mit den Aktivitäten der Hochschul-Institute zu vernetzen, hat im Berichtsjahr zaghafte Fortschritte gemacht. Um die Chancen einer Vernetzung zu erhöhen, sollte der bisher vierte Bereich der Fachhochschul-Institute vergrössert und auf verbrennungsrelevante Material- oder Komponentenforschung ausgedehnt werden.

Da im Frühjahr 2004 für das ganze Amt ein Stopp aller Updates im Internet verfügt wurde, musste der geplante neue Internetauftritt des Programms *Verbrennung* unter [www.energie-schweiz.ch](http://www.energie-schweiz.ch) eingefroren und auf das Jahr 2005 verschoben werden.

Das Programm *Verbrennung 2004 – 2007* wurde der CORE vorgestellt und von der Kommission zur Ausführung freigegeben. Im Jahr 2005 wird es umgesetzt und der Fokus auf folgende Punkte gelegt:

- Neue BFE-Programmstruktur mit neuen persönlichen Verantwortungsbereichen.
- Ausarbeiten von Perspektiven ab Mitte 2006.
- Verbesserte Integration der Fachhochschulen ins Programm.
- Realisierung der Webseite des Programms Feuerung und Verbrennung im BFE-Internet.
- Die gut abgestimmte Förderung von BFE, KTI und Industrie [20 – 23] soll weiterhin verstärkt werden.
- Generell sollte sich bei knapper werdenden BFE-Mitteln der ETH-Bereich stärker engagieren.
- Die Verstromung biogener Gase mit dem *Swiss-Gas-Motor* ist näher zu untersuchen (der am LAV in Zusammenarbeit mit den Firmen *MENAG/DIMAG* und *LIEBHERR* entwickelte *Swiss-Gas-Motor* wurde neu von *MENAG* für den amerikanischen Markt an die Firma *DTE* lizenziert).

## Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe [www.enrgieforschung.ch](http://www.enrgieforschung.ch))

- [1] T. Gerber et al., ([thomas.gerber@psi.ch](mailto:thomas.gerber@psi.ch)) PSI-Villigen: **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** (JB).
- [2] W. Hubschmid ([walter.hubschmid@psi.ch](mailto:walter.hubschmid@psi.ch)) et. al. PSI-Villigen: **Quantitative Laser Induced Fluorescence in Combustion** (JB).
- [3] R. Jeltsch ([rolf.jeltsch@ethz.ch](mailto:rolf.jeltsch@ethz.ch)) et al., SAM/ETH-Zürich: **Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** (JB).
- [4] K. Boulouchos ([boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Direkte numerische Simulation der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** (JB).
- [5] I. V. Karlin ([karlin@lav.mavt.ethz.ch](mailto:karlin@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** (JB).
- [6] T. Gerber ([thomas.gerber@psi.ch](mailto:thomas.gerber@psi.ch)) et al. PSI-Villigen: **Investigation of Spray combustion in Constant Volume Combustion Cell** (SB).
- [7] T. Gerber ([thomas.gerber@psi.ch](mailto:thomas.gerber@psi.ch)) et al. PSI-Villigen: **Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressure** (JB).
- [8] K. Boulouchos ([boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** (JB).
- [9] G. Barroso und K. Boulouchos ([boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)) et al., LAV/ETH-Zürich: **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** (JB).

## Liste der P+D-Projekte

- [10] S. Kunte ([stefan.kunte@psi.ch](mailto:stefan.kunte@psi.ch)) et al., LAV/ETH-Zürich: **Demonstration eines optischen Sensors zur Unterstützung der Entwicklung von schadstoffarmen motorischen Verbrennungssystemen** (JB).
- [11] P. Griebel ([peter.griebel@psi.ch](mailto:peter.griebel@psi.ch)), PSI-Villigen: **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen** (JB).
- [12] K. Boulouchos ([boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emmissionsvorschriften bei niedrigem CO<sub>2</sub>-Ausstoss** (JB).
- [13] K. Boulouchos ([boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Massnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** (JB).
- [14] J. Gass ([juerg.gass@ethz.ch](mailto:juerg.gass@ethz.ch)) et al. LTNT/ETH-Zürich: **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner**.
- [15] I. Mantzaras ([ioannis.mantzaras@psi.ch](mailto:ioannis.mantzaras@psi.ch)) et al. PSI-Villigen: **Partial Catalytic Oxidation of CH<sub>4</sub> to Synthesis Gas for Power Generation Application** (JB).
- [16] K. Boulouchos ([boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Umwandlungseffizienz von Brennstoffzellen und Verbrennungskraftmaschinen für die stationäre, dezentrale Energieversorgung** (JB).
- [17] M. Koebel ([manfred.koebel@psi.ch](mailto:manfred.koebel@psi.ch)), PSI-Villigen: **NO<sub>x</sub>-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR** (SB2003).
- [18] K. Hermann ([hermann@lav.mavt.ethz.ch](mailto:hermann@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber** (JB).
- [19] R. Bunge ([rainer.bunge@hsw.ch](mailto:rainer.bunge@hsw.ch)), HSR-Rapperswil: **Adaptation eines DeNO<sub>x</sub>-Systems auf verschiedene Fahrzeuge** (SB).
- [20] I. Mantzaras ([ioannis.mantzaras@psi.ch](mailto:ioannis.mantzaras@psi.ch)) et al. PSI-Villigen: **Modellierung und Auslegung eines CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen**.
- [21] W. Hubschmid ([walter.hubschmid@psi.ch](mailto:walter.hubschmid@psi.ch)) et al. PSI-Villigen: **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brennern**.
- [22] J. Czerwinski, ([jan.czerwinski@hta-bi.bfh.ch](mailto:jan.czerwinski@hta-bi.bfh.ch)), HTA Biel: **Grundlagen der H<sub>2</sub>-Reformat-zumischung am Ottomotor**.
- [23] K. Boulouchos ([kostas.boulouchos@ethz.ch](mailto:kostas.boulouchos@ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor**.
- [24] K. Boulouchos ([kostas.boulouchos@ethz.ch](mailto:kostas.boulouchos@ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Simulationswerkzeuge für die Optimierung der Brennverfahrensentwicklung bei Grossdieselmotoren**.
- [25] U. Vogt ([ulrich.vogt@empa.ch](mailto:ulrich.vogt@empa.ch)), EMPA- Dübendorf **Schaumkeramik für neuartige keramische Porenbrenner**
- [26] P. von Böckh ([p.vonboeckh@fhbb.ch](mailto:p.vonboeckh@fhbb.ch)), FHBB, Basel: **CATVAP-Burner**.

## Referenzen

Bei Bedarf können die Referenzen beim Programmleiter bezogen werden.

- [27] Andreas Wasler et. al., **Untersuchung ultraschneller Moleküldynamiken in verbrennungsrelevanten Molekülen mit zeitaufgelösten nicht linearen Raman Messungen.**
- [28] M. Meisinger et. al., **Characterization of Vibrationally and Rotationally Excited Molecules by Two-Color Resonant Four-Wave Mixing.**
- [29] R. Barlow et. al., Proc. Comb. Inst. 27:1087
- [30] Tagungsunterlage, SVV-Tagung vom 1. Oktober 2004.
- [31] G. B. Dummond, Ed.: XXVI Task-Leaders-Meeting, Proc. IEA-Conf. Helsinki, August 2004.
- [32] A. Ciani et. al.: **Studies of Structure and Stability of Planar Diffusion and Toroidal Edge Flames in an Opposed Jet Burner.** Proc. Int. Symposium on Comb.. 2004.
- [33] C. Frouzakis et. al., **Three-dimensional simulation of cellular jet diffusion flames,** Proc. Comb. Inst., 185-192, (2005).
- [34] K. Herrmann et. al., **Nitric oxide detection in turbulent premixed methane/air flame,** Proc. Int. Symposium on Comb, 30, 1517-1525, (2005).
- [35] M. Reinke et. al., **Homogeneous ignition of CH<sub>4</sub>/air and H<sub>2</sub>O- and CO<sub>2</sub>-diluted CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> mixtures over platinum; an experimental and numerical investigation at pressures up to 16 bar,** Proc. Int. Symposium on Combustion 2004.
- [36] Ch. Appel et. al: **Partial catalytic oxidation of methane to synthesis gas over rhodium: in situ Raman experiments and detailed simulations.** Proc. Int. Symposium on Combustion, 2004.
- [37] M. Neracher et. al.: **Heterodyne-Detected Electrostrictive Laser-Induced Gratings for Flow Velocity and Temperature Measurements,** Proc. Int. Symposium on Comb. 2004.
- [38] P. Siewert et. al: **Characteristics of Turbulent, High-Pressure, Lean Premixed Methane/Air Flames.** Proc. Int. Symposium on Combustion, 2004.
- [39] W. Hubschmid et. al.: **Oscillating Flame in a Gas Turbine Burner Observed by Phase-Locked OH Laser-Induced Fluorescence and Chemiluminescence.** Proc. Int. Symposium on Combustion, 2004.
- [40] A. Mayer, TTM ([ttm.a.mayer@bluewin.ch](mailto:ttm.a.mayer@bluewin.ch)), Ed., Proc. **8<sup>th</sup> ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles,** August 2004
- [41] M. Reinke et. al., *Combustion and Flame* 136 (2004) 217-240.
- [42] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007,** [www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de](http://www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de)
- [44] A. Hintermann: **Forschungsprogramm Feuerung und Verbrennung 2004-2007.**