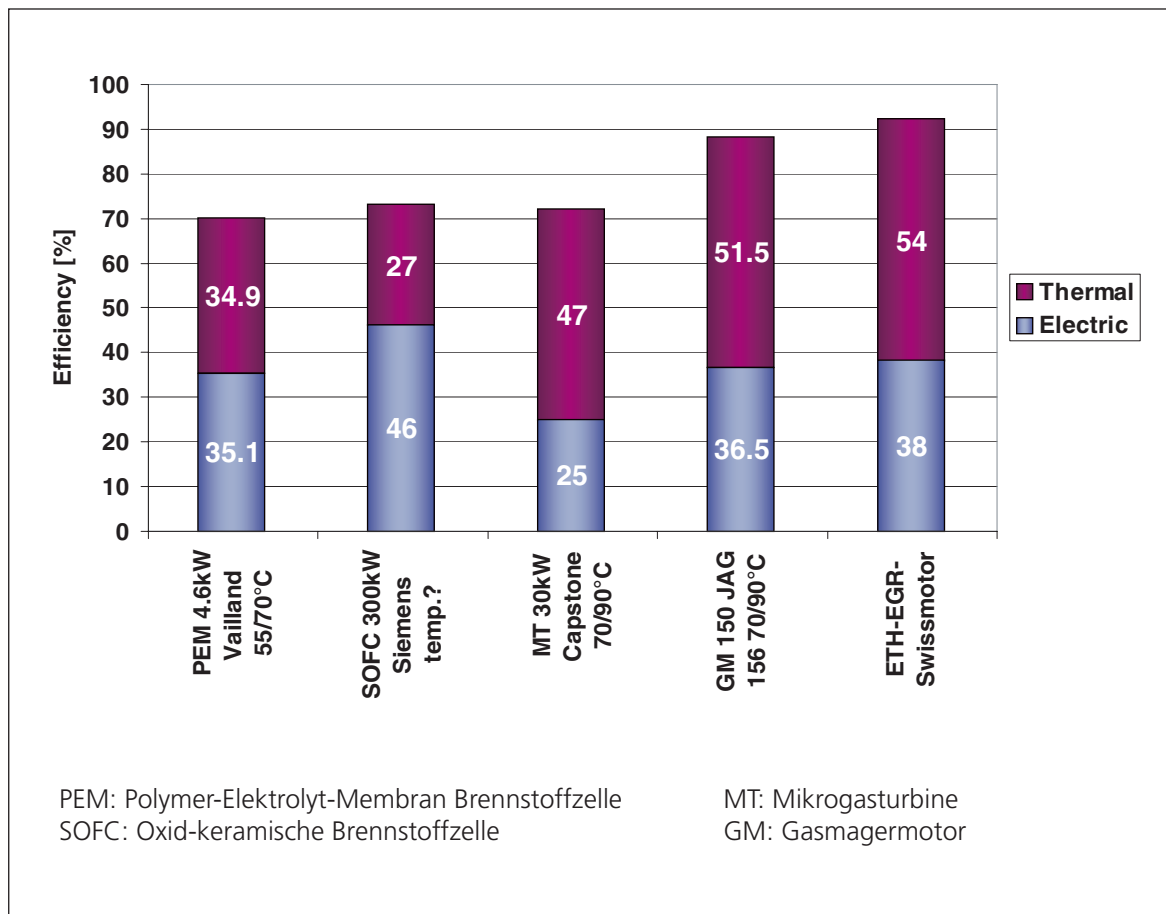


FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Alphons Hintermann

alphons.hintermann@bfe.admin.ch



Brennstoffzellensysteme im Vergleich mit Verbrennungstechnologien

(Quelle: Jenbacher AG und K. Boulouchos ETHZ)

Aktuelle Brennstoffzellensysteme haben noch eine lange Entwicklungszeit vor sich, um die Leistung und Zuverlässigkeit moderner thermischer Verbrennungssysteme zu erreichen, resp. zu überbieten und mit den Kosten gleichzuziehen.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Fossile Energieträger decken nach wie vor den Grossteil unseres Energiebedarfs. Das Programm *Verbrennung* leistet Beiträge zur **simultanen Verbesserung der Energieeffizienz technischer Verbrennungssysteme sowie zur Reduktion derer Emissionen**. Mit diesen Zielsetzungen werden die Grundlagen moderner Verbrennungstechnologien erarbeitet, verstanden und in käuflichen Produkten umgesetzt.

Das Programm stellt längerfristig seine Mittel dafür bereit, dass die Kontinuität in der **Forschung** gewährleistet ist und dass unsere Forscher weiterhin an vorderster Front mithalten können. Die seit Beginn des Programms definierte **Fokussierung der Forschung auf experimentelle Messtechnik, numerische Simulation und Schadstoffreduktion mit optimaler Energieeffizienz** hat sich bewährt. Die Projekte in diesen Schwerpunkten haben oft generischen Charakter, womit das erarbeitete Fachwissen in allen Verbrennungstechnologien einsetzbar ist. So findet beispielsweise die in den letzten Jahren vertieft geförderte Untersuchung der Spray-Verbrennung ihre Anwendung und Umsetzung in Gasturbinenbrennkammern, in Industriefeuerungen und bei der motorischen Verbrennung.

Bei der **Umsetzung** liegen die Schwerpunkte in der **Motoren- und Gasturbinentechnologie**. Dabei ist die Zusammenarbeit mit namhaften Motorenherstellern und der Zulieferindustrie der Automobilbranche zentral. So pflegen die Institutionen des ETH-Bereichs Kontakte zu mehr als einem Dutzend grossen Unternehmen, welche die Effizienzgewinne durch neue Forschungserkenntnisse in grosse Serien vervielfachen.

Die generellen **Ziele** im Mehrjahresprogramm *Feuerung und Verbrennung* [37] 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,
- Vernetzung der Hochschulaktivitäten (ETH Zürich, PSI und EMPA) mit den Fachhochschulen.

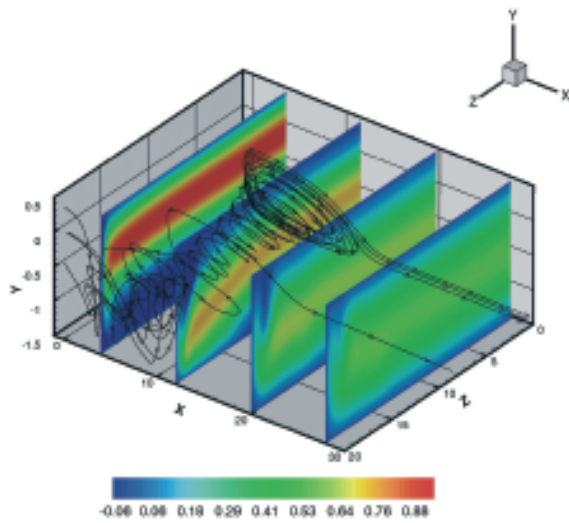
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

Ziele des Projekts ***Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motorenbrennräumen*** [1] waren die direkte numerische Simulation (DNS) zum vertieften Verständnis von generischen Fällen der Wechselwirkung zwischen Turbulenz und chemischer Kinetik einzusetzen und Wege aufzuzeigen, wie gewisse Berechnungen für Flammen von technischer Bedeutung (in Anwendungen beim Industriepartner) künftig modellfrei durchgeführt werden können. Beide Ziele sind praktisch vollständig erreicht worden. Beispiele für die Beschreibung von komplexen Interaktionen zwischen Strömungsparametern und laminaren Flammen sind einerseits die detaillierte Untersuchung des Übergangs von gestreckten Diffusionsflammen zu vorgemischten edge-flames und umgekehrt und andererseits werden instationäre Effekte (Löschen und Wiederezünden) von Diffusionsflammen am Gegenstrombrenner untersucht. Beide Fälle sind wesentlich für das Verständnis und die Modellierung der turbulenten Verbrennung. In Zusammenarbeit mit dem Argonne Na-

tional Laboratory wurde eine voll parallelisierte 3-D-Version für komplexe Geometrien mit Einzschritt-Reaktionskinetik fertiggestellt und ist für Simulationen von Flammen in turbulenten Strömungen oder Übergangsströmungen einsetzbar.

In der ERCOFTAC-Untersuchung ***Induced Global Unsteadiness and Sidewall Effects in the Backward-Facing Step Flow*** [29] wurden grundlegende numerische und experimentelle Studien an einer dreidimensionalen laminaren Strömung über eine rückwärts gerichtete Stufe beschrieben. Im Einklang mit früheren Beobachtungen konnte zum Thema Seitenwandeffekte sowohl experimentell als auch durch Simulation gezeigt werden, dass es bei laminarer Strömung einen Strahl an der unteren Wand gibt, der auf die Kanalmitte gerichtet ist (Fig. 1). Der Effekt der Seitenwände auf die primäre und die oberen Wandrezirkulationszonen wurde demonstriert und damit die bisherige Diskrepanz zwischen Experimenten und zweidimensionalen Simulationen in der Literatur erklärt.

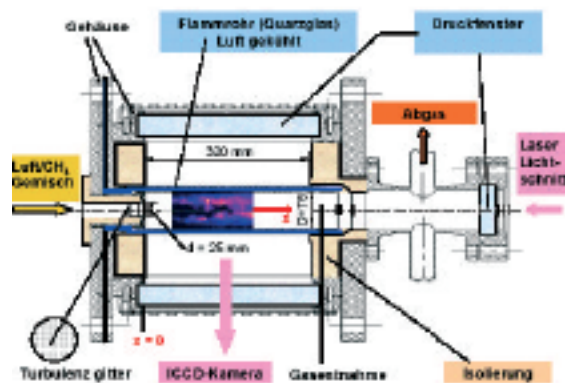


Figur 1: Wege von Wandstrahlen in einer laminaren/ turbulenten Strömung sowie Geschwindigkeitsprofile in verschiedenen yz-Schnittebenen.

Das Projekt **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** [2] wurde abgeschlossen. Neben dem Aufbau des Hochdruck-Verbrennungsprüfstandes (Fig. 2), der Durchführung zweier Vorstudien zur Flammenstabilität und zu laminaren Flammen stand vor allem die Untersuchung des Turbulenzeinflusses auf die Flammenposition und -struktur in Abhängigkeit von Druck, Temperatur, Luftzahl und Geschwindigkeit im Vordergrund. In enger Zusammenarbeit zweier PSI-Gruppen wurde der Beginn der Flammenfront mittels *Laserinduzierter Fluoreszenz* des OH-Radikals (*OH-PLIF*) erfolgreich gemessen. Die Turbulenzcharakterisierung der Strömung konnte mittels *Particle Image Velocimetry* (*PIV*) erfolgreich durchgeführt werden. Die experimentelle Bestimmung der Turbulenzintensität und des turbulenten Makrolängenmasses waren wichtige Voraussetzungen für die gezielte Untersuchung des Einflusses der Turbulenz auf die Position und die Struktur der Flammenfront. Die Ergebnisse umfangreicher Messungen zeigen, dass die Turbulenzintensität proportional zur massenstromgemittelten Geschwindigkeit ist und diese in der Kernzone durch den Einsatz verschiedener Turbulenzgitter gezielt variiert werden kann. Das turbulente Makrolängenmass am Brennkammereintritt entspricht ungefähr dem halben Bohrungsdurchmesser des Turbulenzgitters. Infolge Dissipation der kleinen Wirbel steigen die Werte für das Makrolängenmass mit zunehmender axialer Distanz zum Brennkammereintritt an.

Die OH-PLIF Messungen zeigen, dass die Flammenposition unabhängig vom Brennkammerdruck ist. Dies lässt sich als Druckunabhängigkeit der tur-

bulenten Flammengeschwindigkeit interpretieren. Den grössten Einfluss auf die Flammenposition (Flammengeschwindigkeit) hat die Luftzahl λ . Ein höheres λ führt aufgrund der niedrigeren Verbrennungstemperatur und damit der niedrigeren Reaktionsrate zu einer kleineren turbulenten Flammengeschwindigkeit, in deren Folge sich die Flamme weiter stromab stabilisiert. Die Erhöhung der Turbulenzintensität in der Kernzone durch die Verwendung entsprechender Turbulenzgitter verkürzt die Flamme, da der Stoff- und Wärmeaustausch intensiviert wird. Dies zeigen die statistische Auswertung der OH-PLIF Einzelschussbilder und die gemittelten OH-PLIF-Aufnahmen. Die Fortsetzung dieser experimentellen Arbeiten erfolgt im P+D-Projekt **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen** [13].



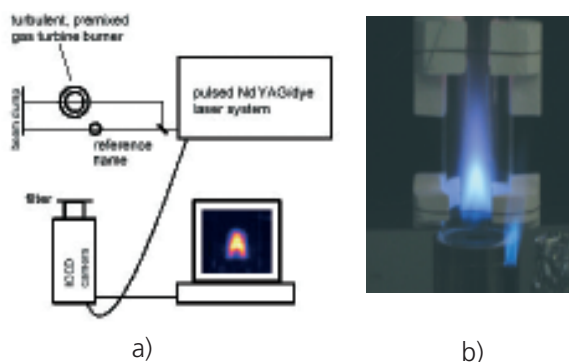
Figur 2: Horizontalschnitt durch den Hochdruck-Verbrennungsprüfstand (Quelle PSI)

OPTISCHE MESSMETHODEN

Das PSI konzentriert sich im Projekt **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauerstoffhaltiger Brennstoffe** [3] auf die Untersuchung von Formaldehyd, ein wichtiges Zwischenprodukt in Flammen. Formaldehyd, H_2CO , spielt eine wesentliche Rolle für die Zündmechanismen eines brennbaren Gemisches. Zudem hängt die Erscheinung von H_2CO mit der Tendenz zur Russbildung zusammen. Mit resonanten, nichtlinearen spektroskopischen Methoden konnten die Spektren von H_2CO und HCO untersucht werden. Die Messungen liefern Daten über angeregte Zustände und den Energietransfer von Rotations- und Vibrationsanregungen im elektronischen Grundzustand dieser Moleküle. Die Information über Relaxationsraten ist wesentlich, um abschätzen zu können, in welchen Zuständen Moleküle in eine nachfolgende Reaktion eintreten. Mit anderen Methoden konnten wichtige, bisher noch nicht

vermessene Moleküldaten bestimmt werden. Ausserdem konnten mit Femtosekunden-Lasern zustandsspezifische Stossparameter für ein modifiziertes Stossmodell eruiert werden.

Eine weitere PSI-Gruppe befasst sich im Projekt **Quantitative Laser Induced Fluorescence (LIF) in Combustion** [4] mit der Anwendung von LIF sowohl bei Gasturbinen- als auch bei Laborbrennern (Fig. 3b). Ziel für beide Brenner ist die Bestimmung von Ort, Form und wenn möglich der Bewegung der Flamme, sowie von der Konzentration des Brennstoffs und anderen Komponenten.



Figur 3: a) Schematischer Aufbau der CH LIF- und Chemilumineszenz Messungen
b) Bilder der turbulenten, vorgemischten Flamme und der Referenzflamme des Bunsenbrenners.

Im Jahr 2002 konzentrierten sich die 2-D-LIF-Anwendungen vor allem auf das Radikal OH. Damit konnten einige Beiträge zur Klärung der thermoakustischen Verbrennungsinstabilitäten beim Industriepartner *Alstom* geleistet werden. Im Berichtsjahr wurden die Grenzen der 2-D-LIF Methode (Fig. 3a) für die Radikale CH und CH_2O ausgelotet. Das Radikal CH ist ein idealer Marker der Flammenfront, während das Radikal CH_2O vor allem quantitative Resultate zur Wärmefreisetzung in Flammen liefert. Bis zu λ -Werten von 1,5 konnten für turbulente Flammen brauchbare CH-LIF-Bilder gemessen werden. Für typisch magere, turbulente Flammen ($\lambda > 1.8$) war die CH-Konzentration unter der Auflösungsgrenze der Messapparatur. Damit ergeben sich keine komplementären Daten zu den früher gemessenen OH-Daten, die Aussagen zur Flamme selbst liefern. Die in diesem Projekt erarbeiteten experimentellen Grundlagen sind wichtige Elemente für das P+D-Projekt [13] und das KTI-Projekt **Thermo-Acoustic Instabilities in Gas Turbines** [25].

Diese LIF-Experimente, ergänzt durch spontane Raman Streuungsexperimente, dienen auch als Datenbasis zur Validierung der verschiedenen am

LAV der ETHZ entwickelten Rechencodes [38]. Validierte Rechencodes kommen immer mehr auch bei Industriepartnern zum Einsatz und leisten einen Beitrag zur Kostensenkung bei der Entwicklung effizienterer, emissionsärmerer Verbrennungstechnologien.

Das Projekt **Experiment turbulente Gegenstromflamme** [5] wird im Jahr 2004 mit 2 Dissertationen beendet werden. Die dort erarbeitete Datenbasis wird eine hervorragende Grundlage für zukünftige Modell-Validierungen darstellen.

NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSPROZESSEN

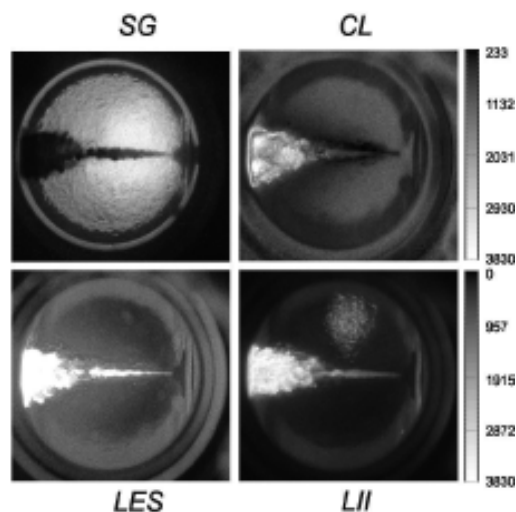
Im interdisziplinären Projekt **Large Eddy-Simulation (LES) in der turbulenten Verbrennung** [6] der vier ETH-Zürich Institute: *Seminar für angewandte Mathematik (SAM)*, *Institut für Fluid-dynamik (IFD)*, *Labor für Verbrennungsmotoren (LAV)* und *Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT)* entwickelt das SAM eine neuartige, mehrdimensionale Lagrange-Transportmethode. Diese basiert auf Darstellungen von Strömungselementen als *Lagrange'sche Finite Volumina*, die bewegt und deformiert werden. Die Simulation mit *Lagrange'schen* Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen reduziert die zur Beschreibung der wichtigen chemischen Reaktionen nötigen Grössen erheblich. Vom LTNT wurde ein transients Flamelet-Code in die kommerzielle Software CFX5.6 implementiert und getestet und soll später in den Code vom SAM implementiert werden. Der LAV und IFD Projektteil, in dem eine turbulente Diffusionsflamme mittels LES berechnet werden soll, wurde in die Teilprojekte: 1.) Inkompressible LES einer Kanalströmung; 2.) Kompressible (für kleine Mach-Zahlen) LES eines runden Jets mit Mischung und veränderlicher Dichte, aber ohne chemische Reaktionen; 3.) LES einer kompressiblen (für kleine Mach-Zahlen) und turbulenten Diffusionsflamme aufgeteilt. Im Berichtsjahr wurde das Teilprojekt 1 beendet, in welchem die inkompressiblen Kanalströmungen für eine Reynolds-Zahl von 2800 simuliert wurden. Die Resultate (Wand-Reynoldszahl, gemittelt Geschwindigkeitsprofil in Strömungsrichtung und die Reynolds-Spannungen) stimmen gut mit exakten Ergebnissen der direkten numerischen Simulation überein. Damit ist auch die Implementierung des LES-Modells für die Strömung abgeschlossen. Der Code für die kompressible Fluid-dynamik (SAM) sowie ein Flamelet-Model (LTNT) sind fertiggestellt und beide Programme können zu einem gemeinsamen Programm zur Grob-struktursimulation von Diffusionsflammen vereint werden.

Durch die Weiterentwicklung zuverlässiger und genauer Simulationswerkzeuge treibt das LAV die Optimierung von Verbrennungssystemen hinsichtlich des Zielkonflikts Energieeffizienz (CO_2 -Reduktion) und Schadstoffemissionen im Projekt **Direkte numerische Simulation (DNS) der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** [7] voran. Die DNS ist ein potentes Werkzeug bei der detaillierten Analyse von Verbrennungsphänomenen. Das diesem zugrunde liegende System von Gleichungen wird mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung gelöst und liefert dadurch zusätzliche Informationen. Da DNS mit sehr grossem Rechenaufwand verbunden ist, sind effiziente numerische Algorithmen und die Parallelisierung grundlegende Voraussetzungen. In den letzten Jahren hat das LAV mit seinem zweidimensionalen DNS-Code grundlegende Phänomene in der Verbrennung mit detaillierten Transporteigenschaften und Chemie untersucht. Dieselben Algorithmen werden jetzt in einen parallelen dreidimensionalen Code für nicht reaktive Strömungen implementiert. Dieser erweiterte Code wird die Basis für die Untersuchung laminarer und transienter Verbrennungsphänomene bilden und später zur Simulation der turbulenten Verbrennung weiter entwickelt. Im Berichtsjahr wurde ein Einschrittmekanismus für die chemische Reaktion und ein vereinfachter Transportmekanismus in den dreidimensionalen Code implementiert und auf einem neu am LAV von der ETH finanzierten 64-CPU Cluster validiert. Die perfekte Skalierbarkeit des parallelen Codes erlaubte es, Instabilitäten in Diffusionsflammen nahe der Auslöschung in einem dreidimensionalen Jet zu untersuchen. Ähnlich wie in Experimenten, welche an der EPFL durchgeführt wurden, zeigten die Simulationen eine zellenförmige Struktur in der Flamme, die aus zwei bis sechs Zellen besteht. Für ein und dasselbe Parameterset wurden koexistierende, zellenförmige Strukturen entdeckt, was auf das experimentell beobachtete Hystereseverhalten hindeutet.

Im Projekt **Weiterentwicklung des Pluto-Brenners** [8] 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 Erfahrungen des LTNT in Sachen Brennermodellierung sollen direkt in die notwendigen konstruktiven Modifikationen des Brenners betreffend Strömung und Wärmeübergängen einfließen. Die Simulationsrechnungen sollen auch die notwendigen Schritte in Richtung billigerer Produktion des Pluto-Brenners unterstützen.

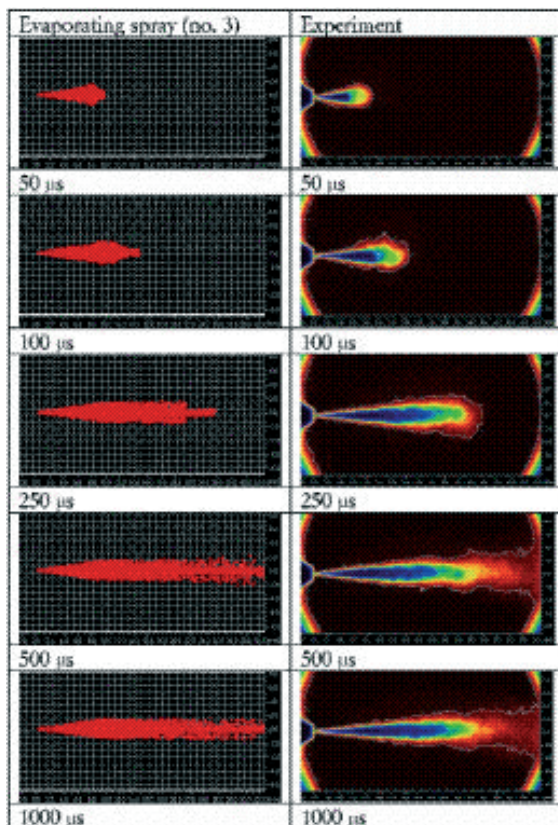
SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

Für die Untersuchung der Verbrennungsmechanismen in einem Diesel-Motorzyklus 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. Im Gegensatz zu einem Diesel-Motor bleibt das Volumen, in dem sich die Flamme entwickelt, bei den PSI-Versuchen konstant (keine Kolbenbewegung). Realitätsnahe Messungen sind deshalb nur für eine kurze Zeit nach Einspritzbeginn möglich. Versuche an diesem Prüfstand bieten aber gegenüber Experimenten mit optisch zugänglich gemachten Motoren den Vorteil, dass in dieser kritischen Phase störungsfreier gemessen werden kann als in einem Experimentiermotor, bei dem der optische Zugang geometrisch stark eingeschränkt ist, und die Fenster durch die notwendigen Schmiermittel nach wenigen Zyklen verschmutzt werden. Im Projekt **Investigation of Spray Combustion in Constant Volume Combustion Cell** [9] wurde die Ausbreitung von Diesel-Sprays (Eindringtiefe, Spraywinkel) bei verschiedenen Drücken und Temperaturen vermessen und mit Modellen verglichen. Durch Einsatz zweier bildverstärkter CCD-Kameras konnten mehrere Visualisierungen der Sprayausbreitung und Verbrennung durch Kombination von Chemilumineszenz- und Mie/Rayleigh-Laserlichtschnittverfahren realisiert werden (Fig. 3). Die mittlere Russpartikelgrösse in Sprayflammen konnte erstmals anhand des zeitlich aufgelösten LII-Signals und von Modellrechnungen zur Energiebilanz der Laser-aufgeheizten Russteilchen ermittelt werden.



Figur 4: Schattenbilder (SG), Chemilumineszenz (CL), Elastische Laser Streuung (LES) und Laser induzierte Incandescence (LII) Bilder, eine Millisekunde nach Einspritzbeginn.

Beim Dieselmotor ist die Gemischbildungsqualität für die homogene Kompressionszündverbrennung magerer Gemische von hoher Wichtigkeit. So werden tiefere Stickoxid- und Russemissionen erzielt. Im Projekt **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeits-Prozesse** [11] werden zündfähige, schwerverdampfende Kraftstoffe (meistens Dieseldestillate), die als Flüssigkeit in den Brennraum eingespritzt werden, numerisch und experimentell untersucht (Fig. 5).

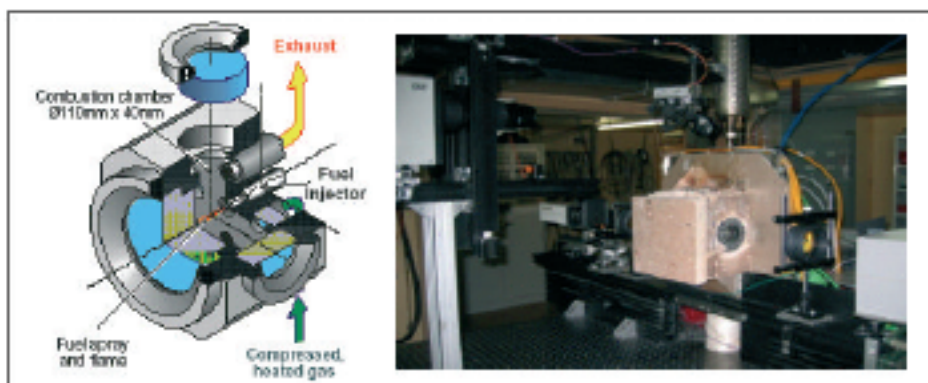


Figur 5: Sprayvisualisierung des gerechneten (links) und des gemessenen Falles (rechts)

Zur Beschreibung der physikalischen Prozesse vom flüssigen Zustand bis zur verdampften Phase müssen sowohl die Prozesse selber wie auch die Wechselwirkungen zwischen den zwei Phasen modelliert werden. Die durchgeführten Berechnungen wurden mit laboreigenen Messungen an einer optisch zugänglichen Hochtemperaturdruckzelle validiert. Es wurden Berechnungen mit n-Butan und n-Heptan als Kraftstoff durchgeführt. Zur Validierung wurden sowohl Daten aus der Literatur wie auch experimentelle motorische Daten der deutschen Forschungspartner herangezogen. Es zeigte sich, dass die Druckverläufe magerer homogener kompressionsgezündeter mit n-Butan betriebener Motoren verlässlich reproduziert werden konnten [31, 39].

Die Entwicklung neuer, energieeffizienter und schadstoffarmer dieselmotorischer Brennverfahren soll aufbauend auf den kürzlich am LAV abgeschlossenen Dissertationen im Projekt **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** [12] durch enge Verknüpfung von Experiment und numerischer Simulation weiter vorangetrieben werden. Die eng miteinander verknüpften Prozesse von Einspritzung, Aufbruch des Brennstoffstrahls und der entstehenden Tropfen, Verdampfung und Mischung von Luft und Brennstoff, Zündung und die nachfolgende Verbrennung werden genauer untersucht. Besonders Gewicht wird auf das Verhalten von Dieseleinspritzstrahlen im Hinblick auf die Zündorte, die Zündverzögerung und die Russentstehung während der Verbrennung gelegt.

Der experimentelle Teil des Projekts untersucht die bei der dieselmotorischen Verbrennung herrschenden Verhältnisse (Druck und Temperatur) mit Hilfe der HTDZ (Fig. 6) des LAV. Die Untersuchung von Dieseleinspritzstrahlen mit der Schlieren-Messtechnik macht die Ausbreitung des ver-



Figur 6: Die Hochtemperatur-Hochdruckzelle (HTDZ) des LAV

dampfenden Brennstoffs sichtbar. Bei der Modellierung (internationale Zusammenarbeit zwischen LAV und *University of Cambridge*, UK) der Zündverzugszeiten wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung für die Fälle mit und ohne Grundturbulenz erreicht.

Im Projekt können Synergien mit einer parallel laufenden Zusammenarbeit des LAV mit der Firma *Wärtsilä* Schweiz genutzt werden. Die Resultate werden nicht nur für die Entwicklung neuer Brennverfahren, sondern auch neuer Injektoren und Einspritzsysteme von Bedeutung sein und sind somit auch für die auf diesem Gebiet sehr starke Schweizer Zulieferindustrie für die Automobilbranche von strategischem Interesse.

Nationale Zusammenarbeit

Das bisher geförderte Fachwissen ist 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 konzentriert. Die enge Zusammenarbeit dieser Institutionen mit Motorenherstellern in der Schweiz (*Liebherr Machines SA*, *Iveco* und *Wärtsilä NSD*) hat Tradition. Nicht zu unterschätzen ist auch die Zusammenarbeit der Hochschulinstitute mit Industriepartnern aus der Zulieferindustrie der Automobilbranche wie *Kistler*, *Common Rail Technologies*, *Bosch*, u.a. Tradition hat auch die Zusammenarbeit des PSI und der ETH-Zürich mit der Firma *Alstom Power*, die in den letzten Jahren durch zusätzliche BFE-, KTI- und EU-Projekte verstärkt wurde.

Die folgenden vier umsetzungsnahen **KTI-Projekte** sind in das laufende BFE-Programm integriert, profitieren von den BFE-Vorleistungen und ergänzen die BFE-P+D-Projekte. Im Projekt **Modellierung und Auslegung eines CO₂ und NO_x freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen** [24] sind die für Ende 2003 vorgesehenen Meilensteine – Katalysatorscreening und Berechnungsmodell – erreicht worden. Die Erkenntnisse aus dem Projekt **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brenner** [25] dienen der Verbesserung der laufenden Generation von *Alstom*-Gasturbinen. Im Projekt **Grundlagen**

der H₂-Reformat-Zumischung am Ottomotor [26] erarbeiten die HTA-Biel, das LAV und der Industrie-Partner *Robert Bosch GmbH* Beiträge zur weiteren Absenkung der Emissionen sowie zur Erhöhung des Wirkungsgrades im Teillastbereich des Ottomotors. Ziel der Partner LAV und *Kistler AG* im Projekt **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor** [27] ist die Realisierung einer Lichtwellenleiter-Sondenspitze, mit welcher im Brennraum kurbelwinkel aufgelöst gemessen werden kann. Damit können neue Einspritz- und Verbrennungsstrategien auch umgesetzt und letzten Endes in der nächsten Motorgeneration strengere Emissionsgrenzwerte erfüllt werden.

Der Vernetzung von Hochschulforschung mit den Fachhochschulen und der Privatwirtschaft diene die Tagung des **Schweizerischen Vereins für Verbrennungsforschung (SVV)** vom Oktober 2003, die unter dem Motto *Schadstoffminimierung bei Verbrennungssystemen* an der Fachhochschule Freiburg abgehalten wurde. Das Angebot des BFE anlässlich der SVV-Tagung 2001, sich vermehrt für Verlängerungen von Diplomarbeiten an Fachhochschulen zu engagieren, wurde im Berichtsjahr nur von der FH in Rapperswil mit dem Projekt **Adaptation eines DeNO_x-Systems auf verschiedene Fahrzeuge** [21] wahrgenommen.

Internationale Zusammenarbeit

Das Jahrestreffen der *European Research Community on Flow Turbulence and Combustion (ERCOFTAC)* www.ercoftac.org und des *Leonhard Euler Kompetenzzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffformation* wurde im Mai 2003 am PSI unter dem Motto: *Measuring Techniques, Combustion and Pollutant Formation* durchgeführt. ERCOFTAC finanzierte auch die Dissertation **Induced Global Unsteadiness**

and Sidewall Effects in the Backward-Facing Step Flow [29] am LAV.

Die Zusammenarbeit im Rahmen des **IEA-Implementing Agreements „Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion** www.im.na.cnr.it/IEA/ findet nach wie vor praktisch nur bilateral auf Eigeninitiative statt. Immerhin bietet das jährliche *Task Leaders Meeting*, das

im September 2003 in Faringdon, *England* durchgeführt wurde [35], unseren Forschern die Gelegenheit, ihre bestehenden Kontakte, u.a. mit dem *Sandia National Laboratory* (USA), dem *National Research Council* (Kanada) und insbesondere mit Japan weiter zu pflegen und auszubauen. Dem Wunsch des ExCo, das *Implementing Agreement* um fünf weitere Jahre zu verlängern, wurde seitens des CERT nicht stattgegeben und es wurde auf drei Jahre reduziert.

Äusserst erfolgreich verlief die seit 1997 jährlich an der ETHZ abgehaltene und vom BFE unterstützte Nanopartikel-Konferenz im August 2003. Unter der Leitung von A. Mayer (TTM Niederrohrdorf) teilten sich das LAV und die FH Aargau die Organisation. Etwa 250 Teilnehmer (neuer Rekord!) aus Europa, Nordamerika, dem fernen Osten und Australien nahmen an der Konferenz teil, um Erfahrungen und neues Wissen zu Russpartikeln aus der dieselmotorischen Verbrennung auszutauschen. Das BUWAL finanzierte die CD-Rom [36] mit den *Proceedings* und weiteren Informationen.

Die Ergebnisse des Projekts **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** [11] fliessen

weiterhin in das internationale Forschungsprojekt **Homogene Dieselverbrennung** der *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen* in Deutschland, ein. Die Forschungsvereinigung finanziert das LAV zusätzlich zum BFE.

Im Bereich der instationären Verbrennung wurde im März 2003 das Projekt **CRICE** (5. EU-Rahmenprogramm) mit Beteiligung des LAV, der *IVECO Motorenforschung AG*, Arbon, und vier weiteren europäischen Partnern erfolgreich abgeschlossen.

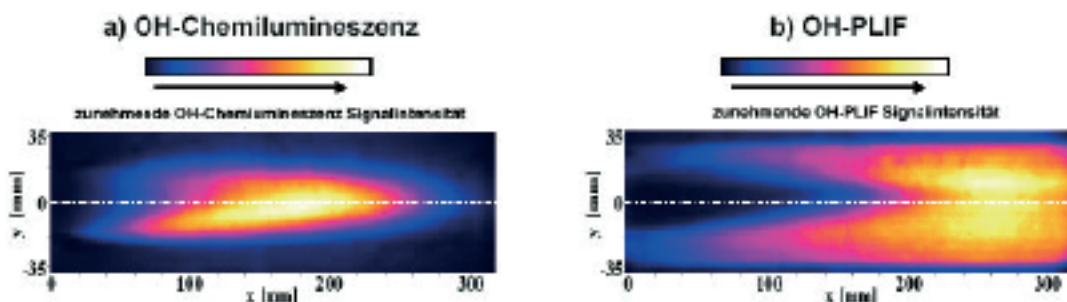
Im Rahmen des 6. EU-Rahmenprogramms befand sich Ende 2003 das grosse integrierte Projekt **HERCULES** in der Unterscheidungsphase. Das Projekt beschäftigt sich mit zukünftigen, energieeffizienten und umweltfreundlichen Antriebstechnologien für die Schifffahrt; beteiligt sind 40 Partner, darunter aus der Schweiz *Wärtsilä/CH*, *ABB Turbosystems*, das LAV, das PSI und die EMPA.

Die Institutionen des ETH-Bereichs arbeiten intensiv mit ausländischen Unternehmen zusammen. So bestehen gemeinsame Projekte mit *GM*, *VW*, *Opel*, *Renault*, *ALV Graz*, *Iveco Turin* und der *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen* e.V. in Deutschland [30].

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Ergebnisse des Projekts **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen** [13] sollen zu einer weiteren Optimierung der mageren Vormisch-Verbrennung für stationäre Gasturbinen im Hinblick auf einen höheren Gesamtwirkungsgrad und geringere Emissionen beitragen. Aufbauend auf das Vorgängerprojekt [2] konnte am Prüfstand (Fig.2) der Einfluss der Betriebs- und Turbulenzbedingungen auf die Wärmefreisetzung im Brennraum charakterisiert werden.

Innerhalb der untersuchten Betriebsparameter hat die Luftzahl den grössten Einfluss auf die Wärmefreisetzung. Eine Erhöhung der Luftzahl λ führt zu einer Stabilisierung der Flamme stromabwärts. Die räumliche Verteilung des Chemilumineszenz- und des OH-PLIF-Signals in Fig. 7 zeigen, dass sich unter den angegebenen Betriebs- und Turbulenzbedingungen stromab des Brennerkopfs eine v-förmige Flamme stabilisiert [34].



Figur 7: OH-Chemilumineszenz (a) und gemittelte OH-PLIF Aufnahme (b) bei Verwendung des Turbulenzgitters g350, xg10 (673 K, 14.4 bar, 40m/s, $\lambda = 2.0$).

Solche experimentellen Daten sind für die Validierung numerischer Flammenmodelle, die künftig zur Auslegung industrieller Gasturbinen eingesetzt werden, von grosser Bedeutung. Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Ausweitung dieser Untersuchungen auf andere Brennstoff/Luftgemische, die sich hinsichtlich der Brenneigenschaften stark von CH_4 /Luftflammen unterscheiden. So sollen durch die Beimischung von H_2 , Gemische mit grösserer turbulenter Flammengeschwindigkeit untersucht werden. Damit kommt man in den Bereich von Bio-Brennstoffen bei denen im Hinblick auf die CO_2 Problematik ein höheres H/C Verhältnis angestrebt wird. Damit diese Forschungsergebnisse optimal umgesetzt werden, wird ab 2004 eine engere Zusammenarbeit mit *ALSTOM POWER* angestrebt.

Die PSI-Erfolgsgeschichte in der Entwicklung von Harnstoff-Entstickungsverfahren und neuartiger Beschichtungs-Katalysatoren für Dieselmotoren setzt sich fort. Die Ergebnisse des abgeschlossenen Projekts ***NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR*** [14] wurden sowohl an internationalen Tagungen präsentiert als auch in wissenschaftlichen Journalen publiziert [36, 41, 42]. Da im Jahr 2005 die deutlich strengere Abgasnorm EURO IV für Nutzfahrzeuge in Kraft treten wird, entwickelt die Industrie zur Zeit mit Nachdruck entsprechende Systeme zur Abgas-Nachbehandlung. Viele der daran arbeiteten Firmen haben deshalb mit dem PSI neue Forschungskooperationen abgeschlossen, sich beraten lassen oder Studien beim PSI in Auftrag gegeben. Durch einen Technologietransfer an die *Wacker AG* (Deutschland) wird das PSI-Know-how bei SCR-Katalysatoren für Dieselfahrzeuge auf den Markt gebracht. Bisher unbeantwortete Fragen der Harnstoff-SCR werden am PSI in einer von der *Wacker AG* finanzierten Dissertation untersucht, um noch bessere Hydrolyse-Katalysatoren zu entwickeln und damit noch kleinere SCR-Systeme zu realisieren. Erste Ergebnisse sind Erfolg versprechend. In einer zweiten von der Firma *Umicore* (ehemals *Degussa Autoabgaskatalyse*) finanzierten Dissertation werden alternative SCR-Katalysatoren untersucht und mit den herkömmlichen Zeolith-Systemen verglichen. Thema einer weiteren PSI-Dissertation ist der katalytische Russabbau in Dieselpartikelfiltern und die Entwicklung neuartiger Beschichtungs-Katalysatoren für Partikel.

Das Projekt ***Simulation eines 3-Zug-Kessels*** [15] der Firma *Ygnis* hat sich als gutes Beispiel erwiesen, wie das an der Hochschule erworbene Know-how gewinnbringend für eine industrielle Entwicklung eingesetzt werden kann. Die Zielset-

zung war, den *Ygnis-Kessel* so zu modifizieren, dass kaltes Rücklaufwasser aus dem Heizsystem ohne Vormischung in den Kessel eingespeist werden kann, ohne dass Kondensation eintritt. Basierend auf dem Grundverständnis, welches die Strömungssimulation im gesamten Kesselvolumen erbrachte, konnte eine einfache Lösung gefunden werden, welche die Anforderungen vollumfänglich erfüllte.

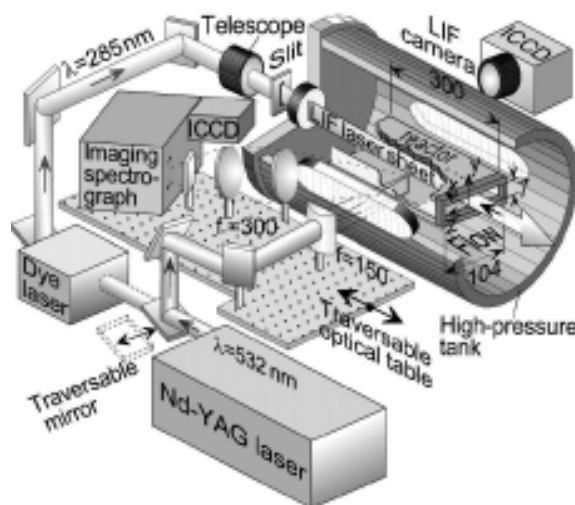
Die diesjährigen Arbeiten im LAV-Projekt ***Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss*** [16] umfassten vor allem die Implementierung eines am LAV entwickelten Modells der Russbildung in der dieselmotorischen Verbrennung mittels 3-D Rechnung (*StarCD*). Da der neue *LIEBHERR*-Motor infolge Lieferungsverzögerung noch nicht zur Verfügung stand, wurden die Simulationen mit einem 1-Zylinder 1-Liter *Medium Duty Common Rail* Dieselmotor durchgeführt. Die ersten Resultate sehen zwar ermutigend aus, müssen aber als vorläufig betrachtet werden, da entsprechende Messdaten, welche die räumliche Verteilung wiedergeben, noch nicht vorhanden sind. Jedoch sind die Emissionen beim Auslass-Öffnen in guter Übereinstimmung mit den Resultaten aus dem 0-D-Simulationstool, für welches das Russmodell ursprünglich entwickelt wurde und ebenfalls mit den Emissionsdaten aus den Messungen im Auslasssystem des Motors. Der neue *LIEBHERR*-Vierzylinder-Motor mit Viertilkopf, Pumpe-Leitungs-Düse, Einspritzsystem und interner Abgasrückführung (D 934L, erfüllt die *off-road* Emissionsstufe TIER 3 $\text{NO}_x + \text{HC} = 4 \text{ g/kWh}$, $\text{PM} = 0.2 \text{ g/kWh}$) wird voraussichtlich Ende Mai 2004 auf dem Prüfstand des LAV laufen. Es soll eine Bestandesaufnahme gemacht werden, welche das Potential des für die *Tier 3-Abgasnorm* zertifizierten Motors bezüglich der kommenden Norm *Tier 4* aufzeigen soll. Dabei werden Variationen von AGR – Technik, Aufladung, Injektoren (Geometrie), Ventilsteuerzeiten (Nockenwellenprofil), Brennraum (Form der Kolbenmulde) und Einspritzverlauf in Betracht gezogen [31,40]. Im Bereich der Messtechnik und Abgasanalytik wird mit der EMPA zusammengearbeitet.

Ziel des LAV-Projekts ***Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus*** [17] ist die Darstellung eines neuen PKW-Antriebs, der bei vollem Potential zur Erfüllung von Nullemissionsstandards (bezogen auf CO , UHC, NO_x , Russ), eine spezifische CO_2 -Reduktion um 25 % gegenüber dem heutigen Stand der Technik aufweist. Es wird dabei von herkömmlichen Treibstoffen wie Benzin, Erdgas

und Diesel (bei letzterem ist die Nullemissions-Tauglichkeit jedoch noch nicht gegeben) ausgegangen, womit Infrastrukturprobleme betreffend Kraftstoffversorgung wie beispielsweise bei Erdgas und Wasserstoff vermieden werden können.

Das LTNT-Projekt: **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner** [18] soll wichtige Beiträge zur weiteren Optimierung der mageren Vormischverbrennung für stationäre Gasturbinen liefern. Projektziel ist die Weiterentwicklung des am LTNT vorhandenen instationären Flamelet-Modells. Dieses soll den für Gasturbinen interessanten Bereich zwischen Diffusions- und teilvorgemischter Verbrennung besser simulieren. Die bisher erhaltenen Resultate sind ermutigend, es müssen aber am Modell weitere Verbesserungen vorgenommen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse werden direkt in die Entwicklung der nächsten Generation von schadstoffarmen Gasturbinen beim Industriepartner Alstom Power einfließen.

Im PSI-Projekt **Partial Catalytic Oxidation Processes for Power Generation Application** [19] wird in Zusammenarbeit mit Alstom Power 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 Verbrennungs-Verfahren dar, da sie auf grundsätzlich neuen Brennstoff-Umwandlungsverfahren basieren. Im Berichtsjahr wurde die partielle katalytische Oxidation von CH_4 zu Synthesegas über Rh/ZrO_2 experimentell und numerisch untersucht. Dabei handelte es sich um Gemische mit einem Brennstoff-zu-Luft Verhältnis von $\phi = 2.5$ und $\phi = 4.0$ bei einem Druck von 4 respektive 6 bar. Die Experimente wurden in einer optisch-zugänglichen, katalytischen Brennkammer im Labor-Massstab durchgeführt (Fig. 8). Eindimensionale Raman-Spektroskopie lieferte die transienten Konzentrationen der Hauptspezies (CH_4 , O_2 , H_2O , CO_2 , H_2 , CO und N_2).



Figur 8: Schematische Darstellung des optisch zugänglichen, katalytischen Hochdruck Kanalreaktors und des Raman/OH-LIF set ups.

Für die numerische Berechnung wurde ein elliptisches, zweidimensionales Simulationsprogramm verwendet, welches detaillierte Reaktionsmechanismen für die katalytischen Prozesse (heterogen) und für die Gasphase (homogen) beinhaltet. Letztere konnten anhand einer im Experiment auftretenden Zündung in der Gasphase validiert werden, wodurch ebenfalls der Bereich im Reaktor mit vernachlässigbarer Kinetik der Gasphase identifiziert wurde.

Im Projekt **Heissgas-Motor** [20] klärt die Firma awtec AG das thermodynamische Verbesserungspotenzial des herkömmlichen Dampfmaschinen-Prozesses bei Einsatz der Direktverdampfer-Technologie ab. Dieser neue Prozess wurde als reiner Gasprozess mit interner Verbrennung und als reiner Dampfkessel mit einer äusseren Wärmezufuhr modelliert. Mit dem Aufzeigen möglicher thermodynamischer Lösungsstrategien wurde das Projekt abgeschlossen.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Die für das Berichtsjahr vorgesehenen Ziele des Programms sind fast alle erreicht worden. Dabei konnte die Qualität und Kontinuität in den Projekten aufrecht erhalten werden. Die Umsetzung der Forschungsergebnisse ist durch die Zusammenarbeit mit mehr als einem Dutzend grossen Industriepartnern gewährleistet.

Mit der Unterstützung von 5 im Berichtsjahr abgeschlossenen Dissertationen (wovon vier beim

LAV [30 – 33]) wurde der Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs weiterhin Rechnung getragen. Ausserdem erhielt K. Hermann Anfang 2003 für seine Dissertation am [43] die ETH-Medaille für *outstanding dissertations* (dies ist die vierte Medaille im Programm seit 1996).

Der im Jahr 2001 begonnene Prozess, die Fachhochschulen untereinander und mit den Hochschulaktivitäten (ETHZ, ETHL und PSI) zu vernet-

zen, geht nur schleppend voran. Für 2004 ist ein neuer Anlauf geplant.

Das Strategiepapier zur künftigen Förderung der Verbrennungsforschung z.Hd. der BFE-Geschäftsleitung [22] liegt nun vor und wird in das Programm 2004 – 2007 z. Hd. der CORE einfließen. Die Darstellung des Programms Verbrennung unter www.energie-schweiz.ch musste aus Zeitgründen auf 2004 verschoben werden.

Neben den festgelegten Projektzielen sollen folgende Punkte zur Durchführung gelangen:

- Das Forschungsprogramm **Feuerung und Verbrennung 2004 – 2007** [37] und entsprechende *Roadmaps* zuhanden der CORE sind auszuarbeiten. Darin wird auch die Konkretisierung des *Near-Zero-Emission* Ziels für Verbrennungskraftmaschinen sichtbar werden. Dazu wird das **Strategiepapier Verbrennungsforschung** [22] eine Basis liefern.
- Der weitere Einbezug der Fachhochschulen ins Programm soll gefördert und entsprechende Netzwerke sollen definiert werden, z.B. ein

gasturbinenorientiertes Netzwerk zusammen mit *Alstom Power*.

- Die SVV-Tagung 2004 wird in Baden Dättwil abgehalten werden.
- Das Programm *Feuerung und Verbrennung* soll im Internet dargestellt werden.
- Die gut abgestimmte Förderung von BFE, KTI und Industrie [24 - 27] soll wegen der drastischen BFE-Budgetreduktionen im P+D-Bereich verstärkt werden.
- 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).

Punkto Umsetzung ist das LAV gefordert: Nach einer ersten Anschubfinanzierung seitens des BFE beschloss VW, das LAV mit einem neuen Projekt betreffend **Massnahmen zur CO₂-Reduktion in PKW-Antrieben** mit Start im Jahr 2004 zu beauftragen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

- [1] C. Frouzakis (frouzakis@lav.mavt.ethz.ch) et al. LAV/ETH-Zürich: **Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motoren Brennräumen** (SB).
- [2] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI-Villigen: **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** (SB).
- [3] T. Gerber et al., (thomas.gerber@psi.ch): PSI-Villigen: **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauerstoffhaltiger Brennstoffe** (JB).
- [4] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et. al.: **Quantitative Laser Induced Fluorescence in Combustion** (JB).
- [5] A. Prospero und L. Blum (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH-Zürich: **Experiment turbulente Gegenstromflamme** (JB).
- [6] R. Jeltsch (rolf.jeltsch@ethz.ch) et al., SAM/ETH-Zürich: **Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** (JB).
- [7] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Direkte numerische Simulation der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** (ZB), ENET 230215.
- [8] S. Baykal und J. Gass (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH-Zürich: **Weiterentwicklung des Pluto-Brenners** (JB).
- [9] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Investigation of Spray combustion in Constant Volume Combustion Cell** (JB).
- [10] S. Kunte (stefan.kunte@psi.ch) et al., LAV/ETH-Zürich: **Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasenströmungen** (JB).

- [11] G. Barroso und K. Boulouchos (boulouchos@lw.iet.mavt.ethz.ch) et al., LAV/ETH-Zürich: **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** (JB), ENET 230219.
- [12] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** (ZB), ENET 230216.

Liste der P+D-Projekte

- [13] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI-Villigen: **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen** (JB).
- [14] M. Koebel (manfred.koebel@psi.ch), PSI-Villigen: **NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR** (SB).
- [15] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al. LTNT/ETH-Zürich: **CFD-Simulation Dreizugkessel** (JB).
- [16] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emmissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss** (JB), ENET 230217.
- [17] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** (JB).
- [18] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al. LTNT/ETH-Zürich: **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner**.
- [19] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Partial Catalytic Oxidation Processes for Power Generation Application**.
- [20] M. Illien (andreas.schlegel@awtec.ch), awtec AG, Zürich: **Heissgas-Motor** (SB).
- [21] R. Bunge (rainer.bunge@hsr.ch), HSR-Rapperswil: **Adaptation eines DeNO_x-Systems auf verschiedene Fahrzeuge** (SB).
- [22] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Strategiepapier Verbrennungsforschung** (SB).
- [23] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Umwandlungseffizienz von Brennstoffzellen und Verbrennungskraftmaschinen für die stationäre, dezentrale Energieversorgung** (JB).
- [24] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Modellierung und Auslegung eines CO₂ und NO_x freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen**.
- [25] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brennern**.
- [26] J. Czerwinski, (jan.czerwinski@hta-bi.bfh.ch), HTA Biel: **Grundlagen der H₂-Reformat-zumischung am Ottomotor**.
- [27] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor**.
- [28] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Totale Wirkungsgrad-Vergleiche aktueller Brennstoffzellensysteme mit dem Swissmotor** (SB).

Referenzen

- [29] N. Tylli; **Induced Global Unsteadiness and Sidewall Effects in the Backward-facing Step Flow: Experiments and Numerical Simulations**, Dissertation ETH-Zürich Nr. 15913, 2003, ENET 230119.
- [30] T. Koch; **Numerischer Beitrag zur Charakterisierung und Vorausberechnung in einem direkteingespritzten strahlgeführten Ottomotor**, Dissertation ETH-Zürich Nr. 14937, 2003, ENET 220343.
- [31] B. Schneider, **Experimentelle Untersuchungen zur Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck**, Dissertation, ETH-Zürich, Nr. 15004, 2003, ENET 230118.
- [32] A. Bertola; **Technologies for Lowest NO_x and Particulate Emissions in DI-Diesel Engine Combustion - Influence of Injection Parameters, EGR and Fuel Composition**, ETH – Dissertation Nr. 15373, ETH-Zürich, 2003.
- [33] Ch. Schär; **Control of a Selective Catalytic Reduction Process**, Dissertation ETH-Zürich Nr. 15221, 2003.
- [34] P. Griebel et. al.: **Flow Field and Structure of Turbulent High-Pressure Premixed Methane/Air Flames: Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, Atlanta, USA**, ENET 230102.
- [35] G. B. Dummond, Ed.: **XXIV Task-Leaders-Meeting**, Proc. IEA-Conf. Faringdon, UK, September 2003.
- [36] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. 7th ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles, August 2003.
- [37] A. Hintermann: **Forschungsprogramm Feuerung und Verbrennung 2004-2007**.
- [38] C. Frouzakis et. al.: **Numerical and Experimental Study of non-premixed Flame Transitionss in Opposed Jet-Burners: Proceedings of the 3rd Meeting of the Greek Section of the Combustion Institute, Patras 2003**.
- [39] G. Barroso et. al.: **An Extensive Parametric Study on Diesel Spray Simulation and Verification with Experimental Data**, Society of Automotive Engineering, SAE 2003-01-3230, 2003.
- [40] A. Bertola, R. Li, K. Boulouchos: **Influence of Water-in-Diesel-Emulsions and EGR on Combustion and Exhaust Emissions of Heavy Duty DI-Diesel Engines equipped with Common-Rail Injection Systems**, SAE 2003-01-3146, 2003.
- [41] O. Kröcher: **NO_x Reduction in the Exhaust of Mobile Heavy-Duty Diesel Engines by Urea-SCR** 6th International Congress on Catalysis and Automotive Pollution Control (CAPoC6), Brüssel, Belgien, 22-24. Oktober 2003.
- [42] M. Elsener, et. al.: **Aufbau und Vermessung eines DeNO_x-Systems auf der Basis von Harnstoff-SCR**, MTZ 11, 966-971 (2003).
- [43] K. Herrmann, **Strömung, Flammencharakterisierung und Stickoxid-Bildung in turbulenten Vormischflammen**, Dissertation ETH-Zürich, Nr. 14552, 2002.