

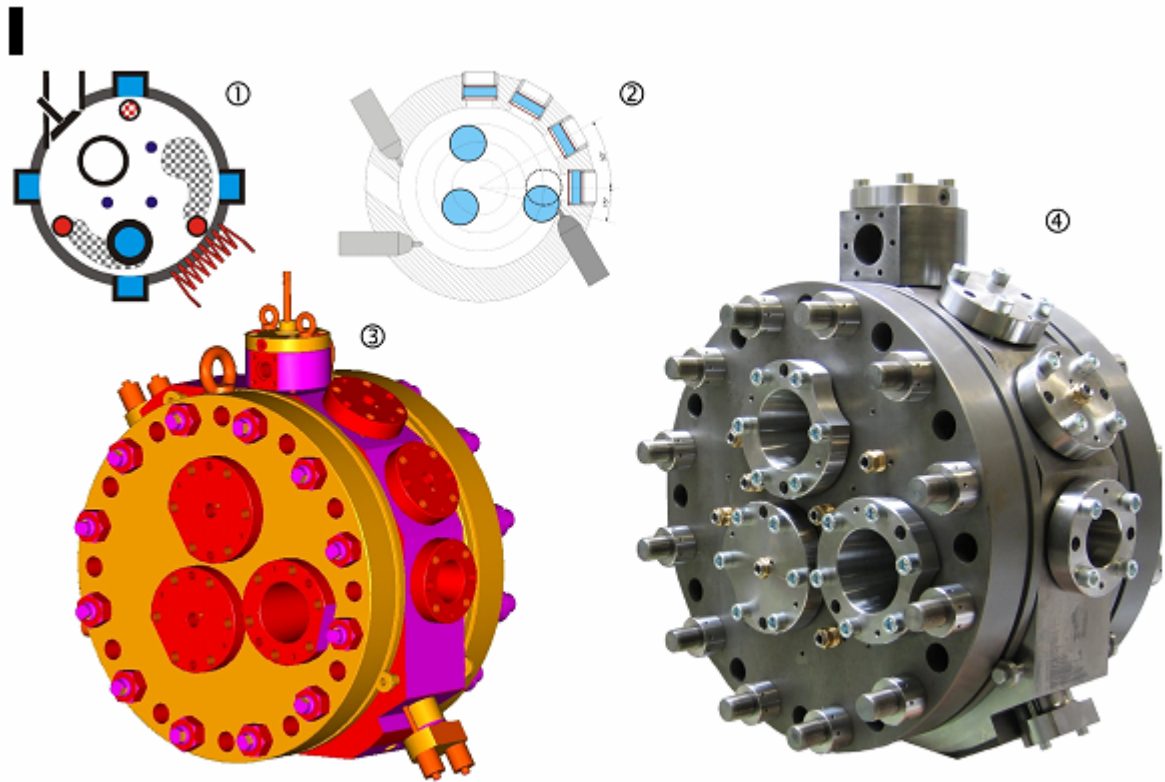


FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2005

Alphons Hintermann

alphons.hintermann@bfe.admin.ch



Experimentelle Daten für grosse 2-Takt-Schiffsdieselmotoren

Im EU-Projekt HERCULES [16] werden neue Technologien für schadstoffemissionsarme Schiffsdieselmotoren der Leistungsklasse von mehreren MW pro Zylinder entwickelt. Entsprechend gross sind die von der ETH-Zürich beim Industriepartner Wärtsilä in Winterthur aufgebauten Versuchsträger (3 t Gewicht und 1,5 m Ø) zur Ermittlung experimenteller Daten. Die Zeit von der ersten Skizze zum fertigen Versuchsträger dauerte 18 Monate. Gleichzeitig wurde das komplexe System für die Steuerung der gesamten Apparatur und die Datenerfassung der globalen Messgrössen konzipiert und gefertigt.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Verbrennungstechnologien werden weltweit noch lange die Energieumwandlungsprozesse dominieren. Der Anteil an Erdöl im Primärenergieverbrauch wird zwar zurückgehen, in absehbarer Zukunft und in zunehmendem Masse aber durch Erdgas, Biomasse, synthetische Brennstoffe (Designer Fuels) und Wasserstoff abgelöst werden. Trotzdem werden fossile Energieträger in den kommenden Dekaden weiterhin einen Grossteil unseres Energiebedarfs abdecken. Auch bei künftig geändertem Brennstoffspektrum werden Effizienzsteigerung und Schadstoffminimierung die zentralen Ziele in der Verbrennungsforschung und der Technologieentwicklung bleiben.

Die internationale Verbrennungsindustrie erarbeitet die notwendige Grundlagen zur Verbesserung ihrer Produkte immer weniger in den betriebseigenen Forschungslaboratorien und kauft sich dieses Wissen vermehrt von kompetenten Hochschulinstituten ein. Hauptgrund ist die kostenintensive Forschung: Die Löhne einer international kompetitiven und überkritischen Forschergruppe und die Kosten für die notwendigen Arbeitsinstrumente (Verfügbarkeit von Rechenleistung und -Rechenodes sowie der notwendigen Versuchsträger zur Validierung) sind für die Industrie an der Grenze des heute Machbaren. :

Mit dem Programm *Verbrennung* ist das BFE seit 1988 bemüht, durch kontinuierlich Unterstützung kompetenter Hochschulgruppen deren Schlagkraft in der Forschung und Attraktivität bei Industriepartnern zu erhöhen. Vor allem an den ETH-Zürich (*Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)*, *Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTN)*, *Institut für Fluidodynamik (IFD)*, und *Seminar für angewandte Mathematik (SAM)*) sowie am PSI wurden die Grundlagen moderner Verbrennungstechnologien sukzessive erarbeitet, vertieft und zeitverzögert mit unterschiedlichem Erfolg in käufliche Produkte umgesetzt. Seit über einer Dekade leisten diese Institute international anerkannte Beiträge zur simultanen Verbesserung der Energieeffizienz technischer Verbrennungssysteme sowie zur Reduktion deren Emissionen. Die seit Beginn des Programms konsequente **Fokussierung der Forschung auf experimentelle Messtechnik, numerische Simulation und Schadstoffreduktion mit optimaler Energieeffizienz** hat sich bewährt. Modellierung gilt heutzutage bei allen namhaften Technologieentwicklern als der Schlüssel zur Optimierung der Verbrennungstechnologien. Die Fokussierung ist ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsprogramms **Verbrennung** gemäss dem **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004-2007** [38].

Neben technischen Fortschritten wurden im Berichtsjahr folgende organisatorischen Ziele anvisiert:

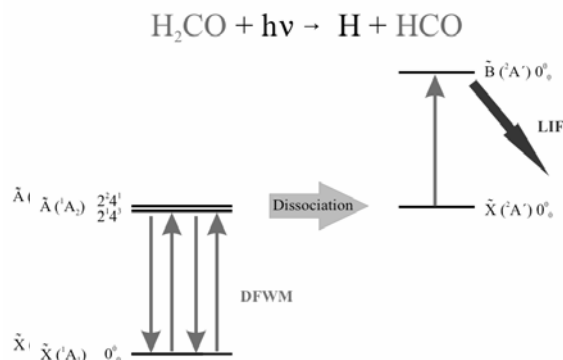
- Verbesserte Integration der Fachhochschulen ins Programm und verstärkte Umsetzung von Forschungsergebnissen durch neue KTI-Projekte,
- Inbetriebnahme des neuen Einhubtriebwerkes am LAV
- Fertigstellung des Versuchsträgers zum EU-Projekt HERCULES (siehe Titelbild)
- Vernetzung der Aktivitäten der ETH Zürich, PSI und EMPA mit den Fachhochschulen und Verstärkung der Kommunikation des Programms nach aussen durch das ERCOFTAC Annual Meeting sowie durch die SVV-Jahrestagung.
- Durchführung des IEA-*Taskleader-Meeting* in Zürich,

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

OPTISCHE MESSMETHODEN

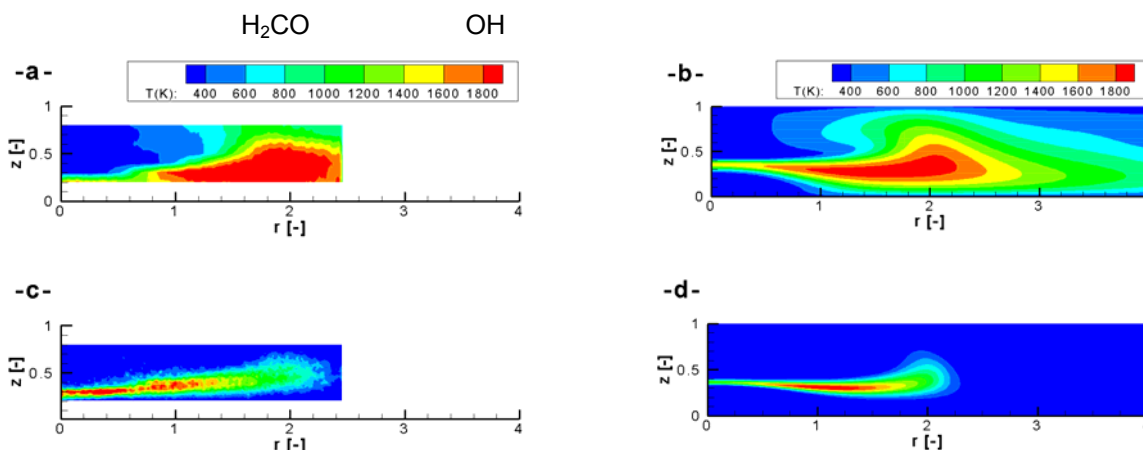
Die Datenbeschaffung für die Validierung von numerisch modellierten Verbrennungsprozessen stellt eine grosse Herausforderung sowohl an die Messmethoden als auch an die Versuchsträger dar. Letztere müssen meist eigens konstruiert werden (siehe Titelbild), um komplexe Vorgänge wie beispielsweise die Brennstoffverdampfung bei der Einspritzung experimentell mit genügender Genauigkeit untersuchen zu können. Optische Messmethoden spielen eine Schlüsselrolle bei der Untersuchung der Grundlagen reaktionskinetischer Verbrennungs-Phänomene. 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 optimalen 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* hat langjährige Erfahrung zur Messung von Reaktionskonstanten wichtiger Zwischenprodukte in Flammen und mit BFE-Mitteln die dazu notwendigen spektroskopischen Methoden entwickelt. Neben Formaldehyd spielen Peroxylradikale eine wesentliche Rolle beim Zünden brennbarer Gemische. Sie bestimmen das Zündverhalten und beeinflussen die Speziation der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung weiterer Reaktionen. Im Projekt **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** [1] bildet die Untersuchung der Rolle dieser Radikale in einer *kalten* Flamme ($< 1000^\circ \text{K}$) den Fokus. Die vorher entwickelten resonanten, nichtlinearen spektroskopischen Methoden, wie PHOFEX und fs-CARS [23], werden gegenwärtig im Rahmen zweier, vom SNF unterstützten, Doktorarbeiten weiterhin angewendet. Sie werden im Hinblick auf die kommenden Peroxyl-Untersuchungen weiterentwickelt und modifiziert. Für die Darstellung von Peroxylen müssen die Laborinstrumente mit geeigneten Quellen für Radikale ausgerüstet werden. Diese Aufgabe ist nicht theoretisch, sondern nur im Experiment lösbar. Die bisher durchgeführten spektrometrischen Messungen zeigen, dass zwar Alkyl-Radikale in genügend grosser Menge herstellbar sind, wegen Assoziation von O_2 resultierenden Alkylperoxylen jedoch noch nicht beobachtet werden können. Der Nachweis von Alkylperoxylen grösser als CH_3O_2 mag daran scheitern, dass die entsprechenden Ionen evtl. nicht stabil sind und sofort nach der Ionisation dissoziieren (Fig. 1). Nur für die Stabilität des CH_3O_2 -Ion gibt es bisher eine experimentelle Evidenz. Für den Nachweis der Peroxylen werden daher noch indirekte massenspektrometrische Methoden (Nachweis der Peroxyl Fragmente) oder spektroskopische Methoden entwickelt werden müssen



Figur 1: PHOFEX Spektren resultieren durch Scannen von DFWM Laserdaten in spezifischen predissociating vibratorischen Bandspektren von Formaldehyden. Mit simultan messbaren LIF-Daten können Zustands-spezifische Information über den Dissoziationsprozess gewonnen werden.

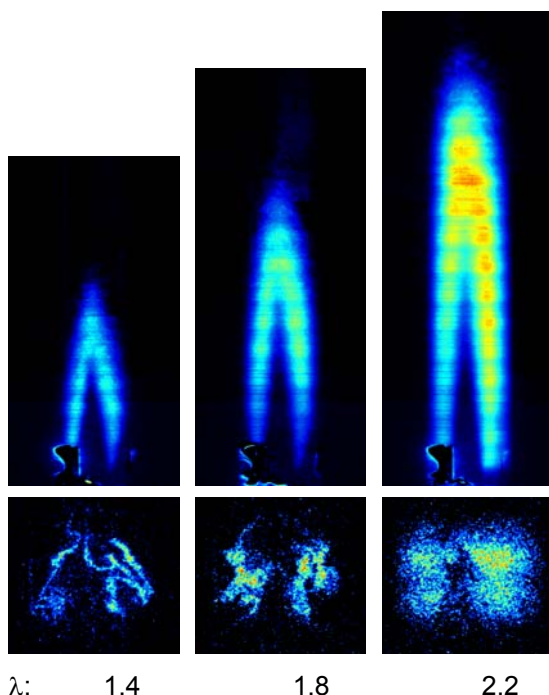
Die PSI-Gruppe *Verbrennungsdiagnostik* befasste sich im Projekt **Quantitative Laser Induced Fluorescence (LIF) in Combustion** [2] mit der Anwendung von LIF sowohl bei Labor- als auch bei Gasturbinenbrennern. Im Berichtsjahr wurden verschiedene Laser-basierte Methoden zur Messung von komplementären Informationen über Temperatur- und Dichteverteilungen wichtiger Radikale entwickelt. Insbesondere konnten aus eindimensionalen Raman-Streumessungen 2-dimensionale Temperatur- und Radikaldichteverteilungen dargestellt werden. Unabhängig davon wurden am LAV numerische Rechnungen in sehr guter Übereinstimmung (Fig. 2) mit dem Experiment durchgeführt [24, 25].



Figur 2: Vergleich von experimentellen (linke Seite) und berechneten (rechte Seite) Temperaturverteilungen (a, b) und von OH-Radikal-Verteilungen in Wasserstoff/Luft Diffusionsflammen (c,d). (Quelle PSI).

Die in den Projekten [2] und [3] erarbeiteten experimentellen Grundlagen sind von hoher Relevanz im P+D-Projekt [10] und im KTI-Projekt [17]. 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 Auslöschen 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].

Die für Flammensimulation von sehr mageren Flammen verwendeten Mechanismen konnten mangels experimenteller Daten noch nicht getestet werden. Im neu gestarteten Projekt **Laserdiagnostik in sehr mageren Flammen** [3] sind Laborexperimente geplant, die spezifischen Fragestellungen nachgehen, die bei der Untersuchung von sehr mageren Flammen mit Luftzahlen λ bis zu 2,5 auftreten (Fig. 3).



Figur 3: Gemittelte und repräsentative Einzelpuls CH_2O LIF-bilder in einer turbulenten vorgemischten Flamme ($T_{\text{preheat}} = 773 \text{ K}$) für verschiedene Luft/Brennstoff Verhältnisse λ .

Die wichtigsten Zielsetzungen des Projekts sind: Erstens, der Vergleich der Eignung der Minoritätsspezies CH_2O , CHO und CH_3O , und der Majoritätsspezies CO zur Visualisierung der Flammenzone mittels LIF bei magerer bis sehr magerer, turbulenter, vorgemischter Verbrennung. Zweitens, der Aufbau eines laminaren Brenners für vorgemischte Flammen für Luftzahlen deutlich grösser als 1.6, sowie Untersuchungen zur Quantifizierbarkeit von CH_2O LIF Messungen in mageren, laminaren Vormischflammen.

NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSPROZESSEN

Das Projekt **Large Eddy-Simulation (LES) in der turbulenten Verbrennung** [4] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Vier ETHZ-Institute: SAM, IFD, LAV und LTNT arbeiteten an effizienten Rechen-codes zur Simulation von turbulenten reaktiven Strömungen und optimierten ihre eigenen Rechencodes. Obwohl die Fortschritte zur Berechnung einzelner Flammen erfolgreich und Validierungen mit experimentellen Daten in guter Übereinstimmung waren, ist zur Zeit ein detaillierter Vergleich der einzelnen Rechencodes untereinander nicht möglich und bedarf noch weiterer Arbeiten.

Direkte numerische Simulation kann sehr detaillierte und genaue Resultate in grosser räumlicher und zeitlicher Auflösung liefern, welche auf andere Weise nur schwer erhalten werden können. Diese Genauigkeit muss allerdings mit einem grossen Rechenaufwand bezahlt werden, welcher die Anwendung von effizienten numerischen Algorithmen und Parallelisierung für Simulationen von Strömungen mit hohen Reynoldszahlen unabdingbar macht. Im Projekt **Direkte numerische Simulation (DNS) der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** [5] wurden die Simulationswerkzeuge des LAV ver-

bessert und den ausgebaut. Die Algorithmen des alten seriellen 2-D/axialsymmetrischen Codes wurden in einen parallelen 3-D Code für nicht reaktive Strömungen implementiert, welcher effiziente Lösungsverfahren verwendet und dessen Rechenleistung auf verschiedenen parallelen Systemen sehr gut mit der Anzahl verwendeter Prozessoren skaliert. Simulationen mit detaillierter Chemie und detaillierten Transporteigenschaften wurden durch die Verknüpfung mit den *Chemkin Bibliotheken* ermöglicht, und ein paralleler Integrator für steife Systeme wurde für die effiziente, implizite Integration der Spezies- und Energieerhaltungsgleichungen in den Code integriert. Dieser parallele Code wird für die Untersuchung von Strömungen in frühen turbulenten Bereich verwendet werden und dient als Basis für die Erweiterungen zur Grobstruktursimulation (Large Eddy Simulation), mit welcher turbulente Flammen modelliert werden können. Was die Anwendungen anbelangt, wurden die Untersuchungen von Verbrennungsinstabilitäten weitergeführt, welche stark von einer Vielzahl von Parametern abhängen und für deren Erklärung und Verständnis eine Kombination von experimentellen und numerischen Resultaten nötig ist. Die seriellen und parallelen Codes wurden für die Simulation der transienten Veränderungen der Flammcharakteristik (Diffusions-/Edgeflamme) in Gegenstrahlbrennern, als auch für die Simulation von zellularen oder pulsierenden Flamminstabilitäten in Jet-Diffusionsflammen nahe der Auslöschung, eingesetzt. Zusätzlich werden momentan mit dem parallelen Code Simulationen der Interaktion von vorgemischten Flammen unterschiedlicher Dicke mit Turbulenz von unterschiedlicher Intensität und charakteristischer Wirbelgrösse durchgeführt. Die so generierten Resultate werden in die Entwicklung von Modellen für turbulente Verbrennung einfließen [27,28].

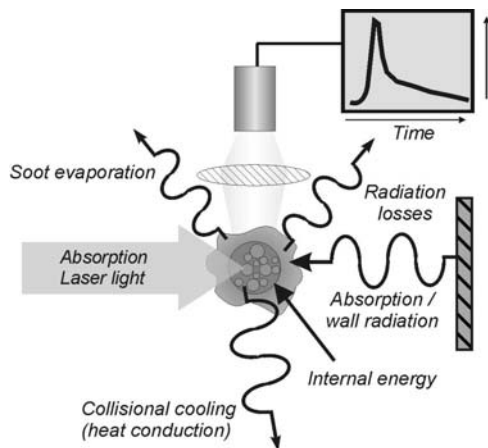
Im Projekt **Lattice Boltzmann Simulationenmethoden für chemisch reaktive Systeme im Mikrobereich** [6] wird eine neue Annäherung für die rechengestützte Strömungsdynamik im Mikrometer-Skalenbereich hergeleitet. Die Annäherung basiert auf die Entwicklung sogenannten Boltzmann Gitter-Modellen (*Lattice Boltzmann Method*) der Boltzmann kinetischen Gleichung. Sowohl die thermischen, als auch die isothermischen Modellen können dargestellt werden. Im Berichtsjahr wurden:

- Das Modell für mehrphasige Strömungen entwickelt, und für die zwei-komponenten Mischungen von Gasen implementiert und getestet.
- Ein rechnerisch effizientes drei-dimensionales Modell für isotherme Strömungen entwickelt und an mehreren „benchmark“-Problemen getestet. Dieses Modell zeigt numerische Stabilität und ist deshalb sehr wichtig bei hohen Reynoldssche Zahl Simulationen. Durch die speziellen Modifikationen von Randbedingungen) ist es gelungen, effiziente Simulationen in Angriff zu nehmen [29].
- Ein drei-dimensionales thermisches Modell entwickelt und realisiert in einigen Benchmark Strömungen.

Theoretische Fragen sind dabei vollständig geklärt, wie der Herleitung von Lattice Boltzmann Methode aus den molekularen Theorien (Boltzmann kinetischen Gleichung), genauso wie praktische Fragen der effektiven Anwendung. Das mikroskopisch abgeleitete thermische Modell verbessert im Wesentlichen die früheren Ergebnisse der isothermalen Modelle. Diese Modelle ersetzen kostspielige mikroskopische Simulationstechniken wie kinetisches Monte-Carlo und/oder molekulare Dynamik für niedrige Mach- und moderate Knudsen-Zahlen. Damit eröffnen sich Möglichkeiten, Strömungen in Mikrokanälen und porösen Medien effizient zu rechnen, was für zukünftige Komponenten von Energiewandlern (Reformer, Katalysatoren, Mikrobrenner, Brennstoffzellen usw.) von grosser Bedeutung ist.

SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

Die Grössenbestimmung der im Dieselmotor erzeugten Russteilchen ist von grossem Interesse für die Charakterisierung des Verbrennungsprozesses bei gegebenen äusseren Betriebsbedingungen (Druck, Temperatur, Brennstoff). In einem Vorgängerprojekt wurde an der Hochtemperatur-/Hochdruckzelle (HTDZ) des PSI ein Experiment zur *in-situ* Teilchengrössenbestimmung sowie zur Zwei-Farben zeitaufgelösten laserinduzierte Inkandeszenz (2-color TIRE-LII), aufgebaut. Im Projekt **Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures** [7] werden experimentelle LII-Signalkurven aus der Hochdruck-Einspritzkammer und einem Dieselmotor zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einspritzbeginn in einem Druckbereich von 0.3-7 MPa wurden bezüglich der Bestimmung mittlerer Teilchenradien und deren Grössenverteilung mittels einer vollständigen „least-squares“ Kurvenanpassung und einer *Quick-fit*-Methode ausgewertet. Die ermittelten Teilchenradien zeigten merkbliche Unterschiede, je nachdem, welches von 3 in der wissenschaftlichen Literatur zitierten Sub-Modellen zur Beschreibung des Abkühlungsprozesses des Teilchenensembles nach der laser-induzierten Aufheizung Verwendung fand. Die ebenfalls getestete Radienermittlung mit Hilfe der *Quick-fit*-Methode hat sich aufgrund geringer Empfindlichkeit der Abklingzeiten gegenüber externen Parametern als nicht praktikabel erwiesen. Die Ergebnisse stellen



Figur 4: Energie- und Massenflüsse in einem laser-aufgeheizten Russteilchen-Ensemble und LII-Messprinzip

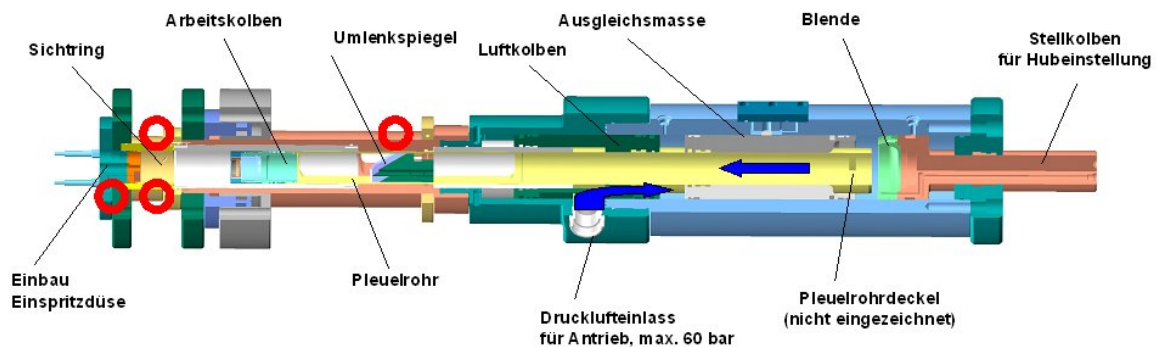
einen wichtigen Beitrag zur augenblicklichen Diskussion der LII-Russdiagnostik (Fig. 4) dar, insbesondere in den wenig untersuchten Bereichen der Verbrennung bei hohen Drücken. Die Erfahrungen aus dem Betrieb und der Entwicklung optischer Messverfahren an der HTDZ am PSI kommen in einem Arbeitspaket des EU-Projekts **HERCULES** [16] beim anwendungsnahen Prüfstand (Titelbild) der Firma *Wärtsilä* zur Gemischbildung und Verbrennung in 2-Takt-Schiffsdieselmotoren zum Einsatz.

Im Projekt **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** [8] werden spezifische Experimente durchgeführt, um die Komplexität des Verbrennungsprozesses und der Emissionen von direkt einspritzenden Dieselmotoren besser zu verstehen. Dazu ist ein gutes Verständnis der Russbildung und -oxidation wesentlich. Diese Vorgänge werden mit bildgebenden (2-D) optischen Methoden in der HTDZ des LAV untersucht. Die Ergebnisse dienen auch zur Validierung von Modellrechnungen, die die Voraussage von Russemissionen erlauben.

Die Experimente zur Untersuchung der Bildung von PM-Emissionen (**Particulate Matter**) wurden unter konstantem Zustand (Druck und Temperatur) des Versuchsträgers durchgeführt, wobei unter konstanten Einspritzzeiten der Einspritzdruck der Common-Rail-Einspritzung variiert wurde. Als optische Verfahren wurde ein auf einer Zweifarbenpyrometrie beruhendes 2-D-Verfahren zur Bestimmung der Russtemperatur und des KL-Faktors (Mass für den Russ-Volumenanteil) sowie die *Back Diffused Laser Technik* (BDL) zur Bestimmung des Russ-Volumenanteils eingesetzt. Im Vergleich ergibt das BDL-Verfahren einen höheren Russ-Volumen-Anteil als der pyrometrisch bestimmte KL-Faktor. Dies ist dadurch zu erklären, dass mit der Pyrometrie nur der heiße leuchtende Anteil des Russes erfasst wird, während mit dem BDL-Verfahren auch kältere nicht leuchtende Anteile einbezogen werden.

Durch Auswerten von gemessenen Verbrennungsdrücken und optischen Signalen wurde der Zündverzug bestimmt. Messungen bei 40 bar Zellendruck, 790 K Zelltemperatur und 3 ms Einspritzzeit zeigen mit steigendem Einspritzdruck (500 bar, 1000 bar, 1300 bar) einen abnehmenden Zündverzug und abnehmenden KL-Faktor wobei die Russtemperatur zunimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei steigendem Einspritzdruck der Brennstoff besser zerstäubt und schneller und intensiver mit Luft vermischt wird, was sich auch durch einen höheren Anteil der vorgemischten Verbrennung zeigt.

Das Projekt **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeits-Prozesse** [9] wurde durch die *Deutsche Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen* (FVV) und dem BFE finanziert. Es hat auf dem Gebiet der Simulation zur Erstellung von chemischen, reduzierten Reaktionsmechanismen von stochastischen Mehrzonenmodellen und zur Kopplung der reduzierten Chemie mit dreidimensionalen-reaktiven-fluid-mechanischen Simulation geführt. Diese Modelle ermöglichen die Einsicht in den Brennraum, um Verbrennungsphänomene für neue Brennverfahren verstehen zu können. Die verwendeten Reaktionsmechanismen repräsentieren die Chemie zweier Kraftstoffe. Der erste, n-Heptan, hat dieselähnliche Zünd- und Verbrennungseigenschaften. Der zweite, n-Butan, hat Zünd- und Verbrennungseigenschaften zwischen Benzin und Diesel. Dies ermöglicht die Untersuchung von technischen Möglichkeiten mit alternativen Kraftstoffen. Die reduzierte Chemie wurde anhand von detaillierten Reaktionsmechanismen validiert und zeigte trotz ihrer Vereinfachung eine sehr gute Übereinstimmung. Die Verbrennungsmodelle wurden mit Messungen von der Universität Stuttgart und der Fachhochschule Dresden validiert und zeigten ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Parallel zu den numerischen Arbeiten [30] wurden experimentelle Untersuchungen am Ein-



Antriebskonzept : gegenläufige Bewegung zweier koaxial angeordneter Kolben



: Optischer Zugang

n	1000 U/min – 3000 U/min
H	stufenlos verstellbar zwischen 120 mm – 250 mm
B	84 mm
ε	5 – 25
$p_{\max}$	200 bar
Drall	möglich
Heizung	Arbeitskolben und Zylinder sind heizbar bis 150 °C

Figur 5: Betriebsparameterbereiche des neuen Einhubtriebwerks (EHT)

hubtriebwerk durchgeführt. Nach aufwändigen Modifikationen im ersten Berichtshalbjahr konnte mit dem EHT, welches seit August 2004 am Institut im Einsatz steht, ein Prüfstand realisiert werden, um unter definierten Bedingungen von T , p und λ sowie qualitativ abhängig vom Homogenisierungsgrad, Zündzeitpunkte sowie Zündorte zu bestimmen (Fig. 5). Zahlreiche Versuche mit n -Butan, n -Heptan und Dieselkraftstoff konnten durchgeführt werden. Messungen mit n -Heptan (dieselähnlich) zeigten einen Beginn der Wärmeumsetzung unabhängig vom Verbrennungsluftverhältnis. Allerdings spielt der Homogenisierungsgrad, resp. der Einspritzzeitpunkt eine entscheidende Rolle. Der direkte Vergleich von Messungen mit konventionellem Dieselkraftstoff und n -Heptan zeigt, dass der Zustand im Brennraum bei Beginn der Wärmeumsetzung praktisch identisch ist. Die unterschiedlichen Verdampfungseigenschaften führen zu einem tieferen Umsetzungsgrad bei Dieselkraftstoff. Mittels der schnellen CMOS High-Speed Kamera konnten Aufnahmen der OH- und CH-Chemilumineszenz realisiert werden. Als grosser Erfolg und als Auszeichnung für die bisherige geleistete Arbeit kann die vom LAV gewonnene FVV-Ausschreibung für das Projekt **Homogene Dieselvebrennung** gewertet werden.

Nationale Zusammenarbeit

Die zur Realisierung von Null-Emissions-Verbrennungssystemen notwendige Grundlagenforschung [1 - 9] kann nur an Hochschulen erarbeitet werden. Das LAV und das LTNT der ETH-Zürich, das PSI und die EMPA nehmen hier – nicht zuletzt dank enger Zusammenarbeit und gemeinsam ausgelegten Prüfständen – eine internationale Spitzenposition ein. In enger Zusammenarbeit dieser Institutionen mit Motorenherstellern in der Schweiz (*Liebherr Machines SA*, *Iveco* und *Wärtsilä NSD*) sowie mit dem Gasturbinenhersteller *ALSTOM POWER* wird in KTI- und EU-Projekten eine rasche Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis gewährleistet. Insbesondere wurde, integriert in das neue *Energy-Science Center* der ETH Zürich, mit Einbezug der CORE und im Hinblick auf eine mögliche Stromversorgungslücke nach Schliessung von zwei Kernkraftwerken um das Jahr 2020, das neue Programm **Kraftwerk2020** konzipiert. Es soll im Jahr 2006 operativ werden.

Die umsetzungsnahen **KTI-Projekte** profitieren von den BFE-Vorleistungen an den Hochschulen. Im Projekt **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brenner** [17] wurde mit zweidimensionaler laserinduzierter Fluoreszenz und Chemilumineszenz angewendet, um Verbrennungsinstabilitäten in kommerziellen Gasturbinenbrennern zu untersuchen. Nachgewiesen wurde, dass die Brennstoffkonzentration durch die Fluktuation des Schalldrucks moduliert ist. Damit konnte ein Rückkoppelungsmechanismus identifiziert werden, der zu thermoakustischen Instabilitäten in Gasturbinenbrennern führt. Diese Erkenntnisse werden zur Verbesserung der laufenden Generation von *Alstom*-Gasturbinen dienen. Im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen wurde das Projekt **Grundlagen der H_2 -Reformat-Zumischung am Ottomotor** [18]. Hier 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.

Die Zusammenarbeit der Hochschulinstitute mit Fachhochschulen durch KTI-Projekte intensivierte sich im Berichtsjahr. Die EMPA entwickelt im Projekt **Schaumkeramik für neuartige keramische Porenbrenner** [20] langzeitstabile Materialien, die beim Industriepartner umgesetzt werden. Das Projekt ist Teil einer umfassenden Zusammenarbeit der EMPA mit einem deutschen Konsortium. Mit Einbezug der ETHZ und ETHL entwickelt die FHBB im KTI/FEV-Vorhaben **CATVAP-Burner** [21] neue Katalysatoren für den Einsatz der CATVAP-Technik in Öl- und Gasbrennern, die später vom Industriepartner gefertigt und in seinen Brennern eingesetzt werden sollen.

Im neuen KTI-Projekt **Weiterentwicklung des Pluto-Brenners als Sturzbrenner in der Heizunit ThermMix®** [22] arbeiten die Fachhochschule NW Schweiz in Muttenz und 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 punkto Schadstoffemissionen weiter verbessert werden. Die Modellierungserfahrungen des LTNT sollen dabei direkt in die Entwicklungsschritte des *Pluto-Brenners* einfließen und die notwendigen Schritte in Richtung billigerer Produktion einleiten.

Im Projekt **Sticore** der Firma awtec geht es um die Entwicklung einer Stirling-Maschine für den Betrieb mit Erdgas und Heizöl. Das BFE finanzierte im Berichtsjahr das Teilprojekt **Brennerentwicklung Öl & Gas** [23]. Nach einer breiten Suche nach möglichen Brennertechnologien, die die sehr spezifischen Anforderungen für den Einsatz bei Stirling Motoren erfüllen können, wurde ein Vorverdampfungsbrenner und ein Porenbrenner für eine detaillierte Konzeptstudie ausgewählt und wichtige Hinweise für die Thermodynamik, Dimensionierung und Konstruktion des Brenners erarbeitet.

Der Vernetzung von Hochschulforschung mit den Fachhochschulen und der Privatwirtschaft diene die Tagung des **Schweizerischen Vereins für Verbrennungsforschung (SVV)** vom 30. September 2005 die unter dem Motto **Anwendungsorientierte Verbrennungs-Forschung in der Schweiz** [35] an der Fachhochschule beider Basel in *Muttenz* 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 30. September 2005 an der Fachhochschule beider Basel in *Muttenz* zu den Themen: *Combustion and Pollutant Formation* und *Measurement & Modelling Techniques* abgehalten.

Bezüglich Zusammenarbeit innerhalb des IEA-Implementing Agreements **Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion** www.im.na.cnr.it/IEA/ sind Fortschritte zu verzeichnen. Verschiedene Untergruppen treffen sich seit einiger Zeit, um gemeinsame Ziele und Aufgaben zu definieren. Das jährliche *Task Leaders Meeting* [36] wurde von LAV und PSI organisiert und fand vom 18. – 21. September in Zürich statt. Am ExCo vom 21. September wurde vom LAV und dem PSI eine Initiative für einen neuen kollaborativen Task mit Titel „*Sprays in Combustion*“ eingebracht.

Stetig zunehmend ist die Teilnehmerzahl der seit 1997 jährlich an der ETHZ abgehaltenen, u.a. vom BFE und BAW unterstützten 9. ETH-Konferenz *über Combustion generated Nanoparticles* [37]. Rund 300 Teilnehmer aus Europa, Nordamerika und dem fernen Osten tauschten vom 15.–17. August 2005 Erfahrungen und neues Wissen zu Russpartikeln und Feinstaubemissionen aus Verbrennungsprozessen aus. Hauptthemen waren Kontrolle der Feinstäube während der Verbrennung, Partikelfilter, Auswirkungen von Feinstäuben auf die Gesundheit und zum Weltklima.

Das BFE unterstützte das vom PSI und der Universität Basel organisierte und am 4.-9. September 2005 durchgeführte *28th International Symposium on Free Radicals*. Gemäss Rückmeldungen war das von rund 150 Forschern aus der ganzen Welt ein voller Erfolg und machte die Arbeiten des PSI [1,23] in der internationalen Forschungsgemeinde besser bekannt.

Die Brennstoffe der Zukunft waren Hauptthema der von der EMPA vom 7. – 8. November 2005 durchgeführten internationalen Konferenz über *Low Carbon Fuels, Methane and Hydrogen based Mobility*.

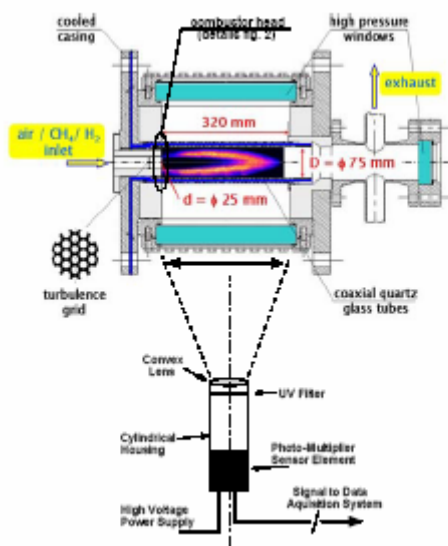
Im EU-Projekt **HERCULES** (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships) [16] werden neue Technologien in Bezug auf Schiffsmotoren entwickelt. Schweizer Partner sind *Wärtsilä/CH*, *ABB Turbosystems*, das LAV, das PSI und die EMPA. Das LAV befasst sich mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für dessen Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Mit Unterstützung des LAV und des PSI wurde bei *Wärtsilä Schweiz* ein Versuchsstand (siehe Titelbild) aufgebaut, mit welchem relevante Bedingungen des Verbrennungssystems grosser Zweitakt-Schiffsdieselmotoren experimentell realisiert werden können. Die kritischen Komponenten wurden zusätzlich verschiedenen Prüfungen (Zugversuche, Risse) unterworfen. Zusätzlich wurden der Kompressor, das Druckspeichersystem, das Einspritzsystem so-

wie das Laborgebäude definitiv ausgelegt. Ferner wurde das komplexe System für die Steuerung der gesamten Apparatur und die Datenerfassung der globalen Messgrößen konzipiert.

Ausserhalb der hier beschriebenen Projekte arbeiten die erwähnten Institutionen im ETH-Bereich 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

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. Im Projekt **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten vorge-mischten Hochdruckflammen** [10] ist vor allem die Interaktion von Turbulenz und chemischer Reaktion bei den spezifischen Betriebsbedingungen einer stationären Gasturbinenbrennkammer von Interesse. Nachdem in den Vorjahren vor allem Messungen zur Charakterisierung des turbulenten Strömungsfeldes und der Flammenstruktur (Position und Fluktuation der Flammenfront, turbulente Flammengeschwindigkeit) von CH_4/Luft -Flammen [31, 32] durchgeführt wurden, standen im Berichtsjahr die Bestimmung der mageren Löschgrenzen und der NO_x -Emission von mit Wasserstoff angereicherten CH_4/Luft -Flammen im Vordergrund (Fig. 6). In der Hochdruck-Brennkammer wurden Messungen für verschiedene Betriebsbedingungen (Vorwärmtemperaturen 673 °K und 773 °K, Drücke bis 14 bar, Eintrittsgeschwindigkeiten 30-80 m/s) und verschiedenen Turbulenzbedingungen (Turbulenzgitter) durchgeführt. Diese experimentellen Daten sind für die Validierung numerischer Flammenfrontmodelle, die künftig zur Auslegung industrieller Gasturbinen mit höherem Gesamtwirkungsgrad und tieferen Emissionen eingesetzt werden sollen, von grosser Bedeutung. Die Ergebnisse sollen mit zu einer wie-

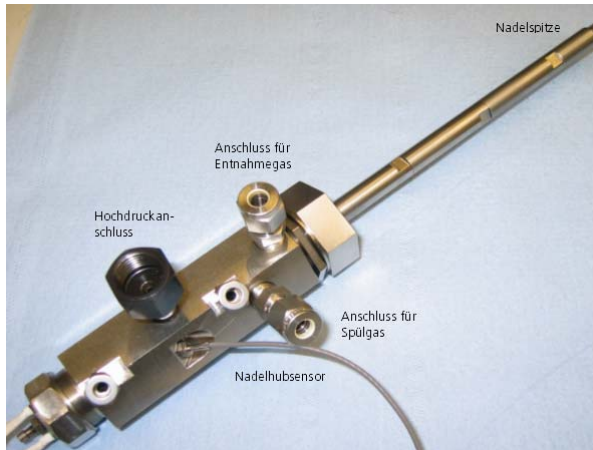


Figur 6: Hochdruck-Brennkammer (Skizze, Horizontalschnitt) und „Flammensensor“.

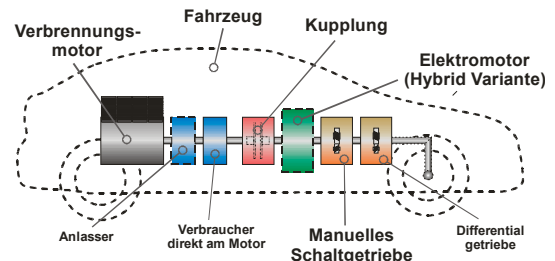
teren Optimierung der mageren Vormischverbrennung für stationäre Gasturbinen im Hinblick auf eine Erweiterung des Stabilitätsbereichs (magere Löschgrenze) und geringere Emissionen beitragen. Grössere turbulente Flammengeschwindigkeiten werden durch die Beimischung von H_2 simuliert. Diese Brennstoffgemische können als Repräsentanten zukünftiger Bio-Brennstoffe angesehen werden, bei denen im Hinblick auf die CO_2 -Problematik ein höheres H/C-Verhältnis angestrebt wird. Sie sind für die Verbrennung in stationären Gasturbinen von grosser Bedeutung, da in Zukunft Erdgasqualitäten mit einem höheren Anteil an höheren Kohlenwasserstoffen aufgrund anderer Förderquellen an Bedeutung gewinnen werden und die sichere, emissionsarme Verbrennung auch für diese Brennstoffe garantiert werden muss.

Die Arbeiten im Projekt **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Diesel-Motoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO_2 -Ausstoss** [11] umfassten die Fertigstellung des Gasentnahme Ventils (Fig. 7) und der 3D-Simulation des Versuchsmotors inkl. Russberechnung sowie der Planung und Vorbereitung des Aufbaus von Probenahme und Aufbereitung für die Partikelcharakterisierung. Der neue **LIEBHERR** Vierzylinder Motor mit Vierventilkopf ist immer noch nicht am LAV eingetroffen. Voraussichtlich wird er Anfangs 2006 am Labor eintreffen und der Prüfstand aufgebaut. Es soll eine Bestandesaufnahme gemacht werden, welche das Potential des für die Tier 3 Abgasnorm zertifizierten Motors bezüglich der kommenden Norm Tier 4 darstellen soll.

Wegen der Lieferverzögerung des D934 DI-Dieselmotors mit Vierventiltechnik, wurde für den vorhandenen **LIEBHERR** D924 DI-Dieselmotor mit Zweiventilkopf ein 3-D Simulationsmodell entwickelt und validiert. Einige Betriebspunkte wurden erfolgreich simuliert. Zusammen mit den Ergebnissen der Russberechnung an einem Projektfremden Motor werden demnächst gute Resultate der Betriebspunkte inklusive Russbildungsverlauf und -verteilung erwartet. Die Vorbereitungen der Partikelmess-technik sind abgeschlossen. Es wurden Erfahrungen mit der Analyse von Partikeln aus anderen Motoren gesammelt. Weiter wurde ein Programm für die Datenerfassung erstellt und erfolgreich getestet. Im Bereich der Messtechnik und Abgasanalytik wird eng mit der EMPA zusammengearbeitet.



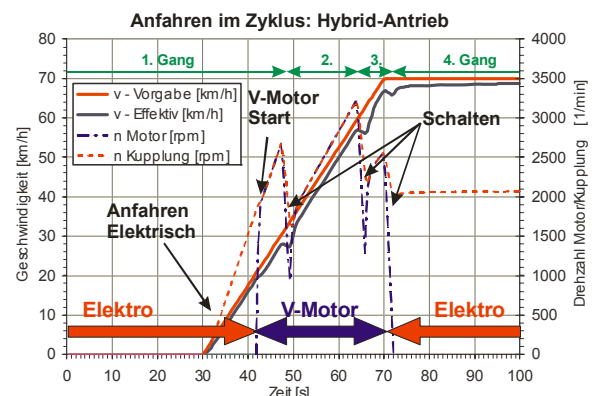
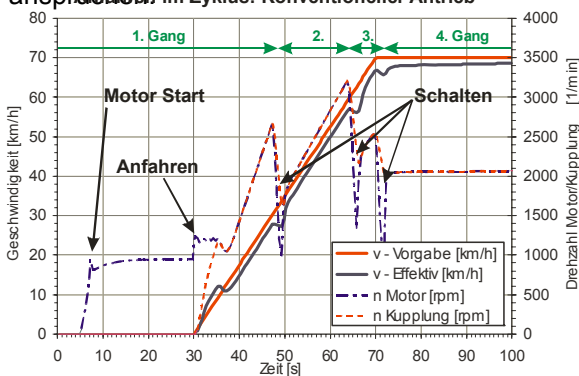
Figur 7: Zusammengebautes Gasentnahme Ventil



Figur 8: Untersuchtes Fahrzeugmodell und Komponenten

Das Ziel des Projekts **Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** [12] besteht in der Auslegung eines teillastoptimierten Antriebs für PKW-Anwendungen mittels ausgeklügelter Simulation. Dabei rücken vermehrt Konzepte in den Vordergrund, die einen starken Elektrifizierungsgrad in Kombination mit einem entsprechend konfigurierten Verbrennungsmotor aufweisen. Im Berichtsjahr ist es gelungen, das Grundgerüst des neuen auf Matlab/Simulink beruhenden Modells zu vervollständigen und erste Ergebnisse für ein übliches Fahrzeug (Fig. 8) im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) zu präsentieren. In guter Übereinstimmung mit – zur Zeit in der Literatur spärlich vorhandenen Messdaten – konnte mit einem *Mild-Hybrid*-Antrieb gegenüber dem herkömmlichen Verbrennungsmotor-Antrieb ein Verbrauchsvorteil im NEFZ von knapp 25% errechnet werden (Fig. 9). Der Nutzen des neuen Modells kann erst dann voll ausgeschöpft werden, wenn zusätzliche Komponenten und deren dynamisches und thermisches Verhalten (z.B. Abgaskatalysatoren) in der Struktur der Software berücksichtigt werden. Um diese Erweiterung vorzunehmen und umfangreiche Simulationsfälle durchzurechnen, so dass das CO₂-Reduktionspotential diverser Massnahmen zuverlässig und vergleichend abgeschätzt werden kann, wird noch ein halbes Jahr beansprucht.

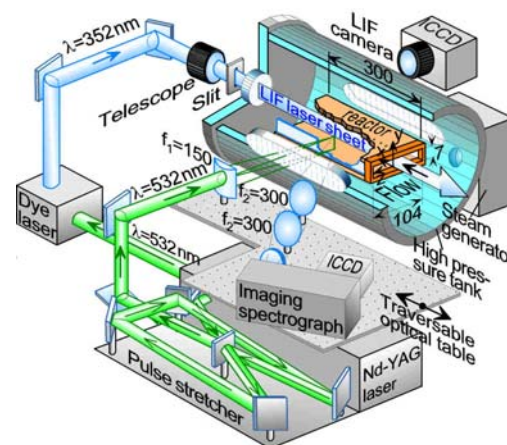
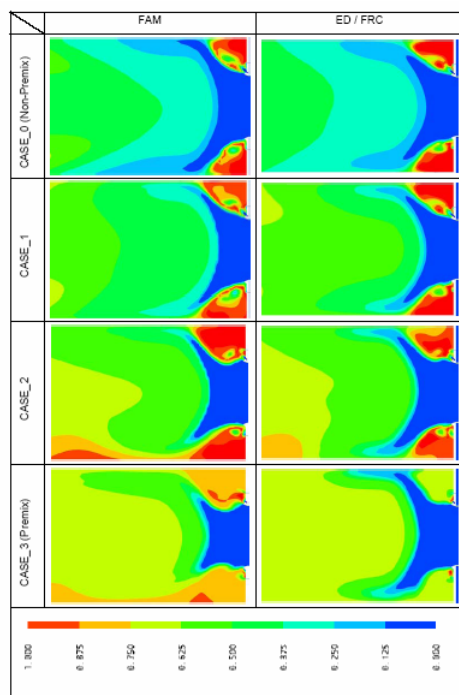
Anfahren im Zyklus: Konventioneller Antrieb



Figur 9: Anfahren und Gänge schalten. Ausgezogene Linien: Soll- und Ist-Fahrzeug-Geschwindigkeit, Gestrichelte Linien: Drehzahlen des Motors und der Kupplung (Getriebeseite), beim Hybrid entspricht dies der Elektromotordrehzahl

Verbrennungssysteme der neuesten Generation mit tiefen Emissionswerten und hoher Brennstoffnutzung werden durch ein kombiniertes Konzept der zwei Hauptverbrennungskategorien Diffusions- und Vorgemischte Verbrennung realisiert, welches teilvorgemischte Verbrennung genannt wird. Die heute gängigen Verbrennungsmodelle sind nicht in der Lage, den Grenzbereich zwischen Diffusions- und teilvorgemischter Verbrennung vernünftig abzubilden. Ziel des Projektes **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner** [13] ist die Weiterentwicklung des vorhandenen instationären

Flamelet-Modells, um diesen interessanten Zwischenbereich besser zu simulieren. Im Berichtsjahr wurde der neue Ansatz „Flame Age Model“ (FAM) mit einer besser definierten transienten Zeitkonstante entwickelt und gegen die experimentellen Daten von einer hochturbulenten Flamme in einem Reaktor (Fig. 10) geprüft [33]. Während eines Praktikums bei Firma ALSTOM, wurde FAM verwendet um die Flamme des neuen ALSTOM Brenners zu berechnen. Die Simulationsergebnisse (Fig. 11) zeigen dass, der neue FAM eine grosse Elastizität aufweist. FAM kann nun — neben Diffusionsflammen — auch teilvorgemischte und gemischte Verbrennungsprozesse vernünftig simulieren.



Figur 10: Schema des Reaktors und optischem Set up für die LIF-/Raman-Messungen

Figur 11: Temperaturverteilungen in der Verbrennungskammer einer ALSTOM Gasturbine

Im Projekt **Partial Catalytic Oxidation of CH₄ to Synthesis Gas for Power Generation Application** [14] wird den Entwicklungstrends nachgegangen, mittels neuer Brennverfahren noch geringere Emissionen (NO_x < 10ppm) und höhere Wirkungsgrade (η > 60%) zu erreichen. Viel versprechende Alternativen stellen katalytisch unterstützte Verbrennungsverfahren dar, die auf grundsätzlich neuen Brennstoff-Umwandlungsverfahren basieren. Die partielle katalytische Oxidation (PCO) von Methan zu Synthesegas (H₂ und CO) wurde unter gasturbinen-relevanten Bedingungen untersucht. An der experimentellen Front wurden die Laser induzierte Fluoreszenz (LIF) des Formaldehyd Moleküls zur Bestimmung der Gasphasenzündung im optisch zugänglichen katalytischen mit Rh/ZrO₂ beschichteten Kanalströmungsreaktor [34] angewandt. In Kombination mit in-situ Raman Messungen (Fig. 11) und detaillierten numerischen Berechnungen wurden durch die LIF Daten hetero-/homogene Reaktionsschemata für Drücke bis 10 bar validiert. Die validierten Schemata wurden anschliessend benutzt um den chemischen Einfluss von H₂O und CO₂ (die Abgasrückführung darstellen) auf die PCO zu beleuchten. Es wurde herausgefunden, dass H₂O eine Quelle für Sauerstoff und das Hydroxyl Radikal auf der Katalysatoroberfläche darstellt und dadurch die Methan Konvertierung und die Wasserstoff Selektivität erhöht sowie die CO-Selektivität senkt. Ferner wurde gezeigt, dass durch Abgasrückführung die Oberflächentemperaturen auf 1150 °K gehalten werden konnten, was für den Katalysator /Reaktor erträglich ist, obwohl um 200 °K überadiabatische Temperaturen erreicht wurden. Ferner wurden am Reaktor Ausgang bis zu 19%vol Wasserstoff erreicht, was den Vorteil der erhöhten Wasserstoff Selektivität durch Abgasrückführung demonstriert. Mit seiner PCO-Fachkompetenz nimmt das PSI zusammen mit 10 europäischen Partnern am **EU-Projekt Advanced Zero Emission Power** teil.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

In den beschriebenen Projekten haben die Forscher und ihre Kooperationspartner wie bisher sehr gute Arbeit geleistet und ihre Fachkompetenz national wie auch international unter Beweis gestellt.

Dank erfolgreich eingereicherter KTI- und EU-Projekte konnte die Umsetzung der Forschungsergebnisse mit Partnern aus der Industrie fortgesetzt werden. Verzögerungen gab es beim Erstellen des Versuchsträgers im Projekt HERCULES [16], die jedoch in den ersten Monaten 2006 aufgeholt werden können. Bei verschiedenen LAV-Projekten wurde eine Projektverlängerung ohne Kostenfolge beantragt. Insgesamt verliefen die Aktivitäten 2006 im Programm Verbrennung gemäss dem **Energieforschungskonzept 2004 – 2007**.

Die mit BFE-Mitteln seit 1989 kontinuierlich unterstützte Erforschung der Harnstoff-SCR konnte nach Abschluss des Projekts **NOx-Vermindeung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR** [17] erfolgreich in die Praxis umgesetzt werden. Zusammen mit dem Institut für Regeltechnik der ETH-Zürich wurde ein Harnstoff-SCR-Gerät minimalster Grösse entwickelt, das in jeder Phase der Autofahrt die Harnstofflösung exakt dosiert und so mehr als 90% der Stickoxide in den Abgasen unschädlich macht. Diese Leistung wurde mit einem Preis im Rahmen des **Swiss Technology Award 2005** ausgezeichnet.

Mit Titel „Bestellbuch voll, Kasse leer“ meldete die baz im August 2005, dass der MENAG die Liquidation droht. Dies trotz vorhandener BHKW-Spitzentechnologie und dem im Januar 2005 erhaltenen Innovationspreis beider Basel. Kernstück des von der MENAG umgesetzten BHKWs ist der mit BFE-Mitteln vom LAV der ETH Zürich entwickelte Swissmotor mit Abgasrückführung (AGR). Der Swissmotor brillierte mit Weltrekorden sowohl punkto Leistung als auch mit minimalen Abgaswerten.

Infolge der zeitlich verzögerten Einführung des neuen, für alle Ämter gültigen neuen Webauftritts des Bundes musste der geplante Webauftritt des Programms *Verbrennung* auf das Jahr 2006 verschoben werden.

Das neue Programm *Kraftwerk2020* wurde initiiert. Es wird neben Teilen des bestehenden Programms Verbrennung auch nicht direkt verbrennungsrelevante Aspekte umfassen.

Der langjährige Prozess, die Fachhochschulen untereinander und mit den Aktivitäten der Hochschul-Institute zu vernetzen, hat im Berichtsjahr weitere Fortschritte gemacht. Um die Chancen einer Vernetzung zu erhöhen, sollte der bisher visierte Bereich der Fachhochschul-Institute vergrössert und auf verbrennungsrelevante Material- oder Komponentenforschung ausgedehnt werden. Dies wird im Programm *Kraftwerk2020* vermehrt der Fall sein.

Für 2006 liegt der Fokus des Programms Verbrennung auf folgenden Punkten:

- Übergabe des Programms an die neuen Programmleiter und Abgrenzung gegenüber dem neuen Programm *Kraftwerk 2020*
- Ausarbeiten von Perspektiven bis Mitte 2006, Formulierung und Absprache mit der CORE von Inhalten zum *Energieforschungskonzept 2008–11*.
- Weiteres Verbessern 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 [10-22] soll weiterhin verstärkt werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter den angegebenen Publikationsnummern in Klammern)

Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

- [1] T. Gerber et al., (thomas.gerber@psi.ch) PSI-Villigen: **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** (JB).
- [2] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et. al. PSI-Villigen: **Quantitative Laser Induced Fluorescence in Combustion** (SB).
- [3] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et. al. PSI-Villigen: **Laserdiagnostik in sehr mageren Flammen** (JB).
- [4] M. Küng (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch) et al., ETH-Zürich: **Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** (SB).
- [5] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Direkte numerische Simulation der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** (SB).
- [6] I. V. Karlin (karlin@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Lattice Boltzmann Simulationen für chemisch reaktive Systeme im Mikrobereich** (JB).

- [7] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al. PSI-Villigen: *Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressure* (JB).
- [8] K. Boulouchos (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) et al., LAV/ETH-Zürich: *Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse* (SB).

Liste der P+D-Projekte

- [10] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI-Villigen: *Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen* (JB).
- [11] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: *Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss* (JB).
- [12] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: *Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus* (JB).
- [13] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al. LTNT/ETH-Zürich: Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner.
- [14] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al. PSI-Villigen: Partial Catalytic Oxidation of CH₄ to Synthesis Gas for Power Generation Application (JB).
- [15] M. Koebel (manfred.koebel@psi.ch), PSI-Villigen: *NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR* (SB2003).
- [16] K. Hermann (hermann@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: *HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber* (JB).
- [17] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al. PSI-Villigen: *Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brennern*.
- [18] J. Czerwinski, (jan.czerwinski@hta-bi.bfh.ch), HTA Biel: *Grundlagen der H₂-Reformat Zumischung am Ottomotor*.
- [19] A. Schlegel (andreas.schlegel@awtec.ch) awtec Zürich: *Brennerentwicklung Öl & Gas* (SB)
- [20] U. Vogt (ulrich.vogt@empa.ch), EMPA- Dübendorf *Schaumkeramik für neuartige keramische Porenbrenner*
- [21] P. von Böckh (p.vonboeckh@fhbb.ch), FHBB, Basel: *CATVAP-Burner*.
- [22] P. von Böckh (p.vonboeckh@fhbb.ch), FHBB, Basel: *Weiterentwicklung des Pluto-Brenners als Sturzbrenner in der Heizunit ThermMix®*.

Referenzen

- [23] M Tulej, et. al.: *Photo-fragment excitation spectroscopy (PHOFEX) by DFWM and LIF: propensities for H₂CO -> HCO+H near the S-o threshold*. Journal of Raman Spectroscopy 36 (2005) 109-15.
- [24] A. Ciani, W. Kreutner, W. Hubschmid, C. E. Frouzakis, K. Boulouchos: *Experimental Investigation of the Structure and Stability of Diffusion and Edge Flames in an Opposed Jet Burner*, submitted to Combustion and Flame, 2005.
- [25] M. Reinke, J. Mantzaras, R. Bombach, S. Schenker, A. Inauen: *Gas phase chemistry in catalytic combustion of methane/air mixtures over platinum at pressures of 1 to 16 bar*, Combust. Flame 141, 448-468, 2005
- [26] C.E. Frouzakis et. al. *Three-dimensional numerical simulations of cellular jet diffusion flames*", Proc. Comb. Inst., 30, (2005).
- [27] C.E. Frouzakis et. al. *Numerical Simulations of Jet Diffusion Flame Pulsations Close to Extinction*", Proc. Comb. Inst., (submitted), (2005).
- [28] M. A. Ciani, et. al., *Counterflow edge flames: their structure and dynamics at extinction limits*", Proc. Comb. Inst., (submitted), (2005).
- [29] S. Ansumali, et. al.: *Thermodynamic Theory of Incompressible Hydrodynamics*, Phys. Rev. Letters **94**, 80602 (2005), *Consistent Lattice Boltzmann Method*, Phys. Rev. Letters, (2005), *Entropic Lattice Boltzmann method for micro-flows*, Physica A **359**, 289-305 (2006).
- [30] G. Barroso, et. al., *Experimental and Numerical Investigations on HCCI-Combustion*, SAE Naples Section, ICE 2005, 7th International Conference on Engines for Automobile, Capri (Italy), September 2005.
- [31] P. Griebel, et. al.: *Flame characteristics and turbulent flame speeds of turbulent high-pressure, lean premixed methane/air flames*, GT-2005-68565, ASME/TURBO EXPO 2005, 06-09 June 2005, Reno-Tahoe (USA), 2005.
- [32] P. Griebel, R. Bombach, A. Inauen, R. Schären, S. Schenker, P. Siewert, *Charakteristika und turbulente Flammengeschwindigkeit von mageren, vorgemischten Methan/Luft-Hochdruckflammen*, 22. Deutscher Flammentag, Braunschweig (D), 21.-22. September 2005.
- [33] S. Piffaretti, et. al.: *Transient flamelet modelling of diffusion and partially premixed flames*, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Combustion, Lisbon, Portugal, 2005.
- [34] J. Mantzaras, et. al., *Combustion and Flame* 141 (2005) 448-468.
- [35] Tagungsunterlage, *ERCOFTAC Annual Meeting und SVV-Tagung* vom 30. September 2005.
- [36] G. B. Dummond, Ed.: *XXVII Task-Leaders-Meeting*, Proc. IEA-Conf Zürich, August 2005.
- [37] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. 9th *ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles*, August 2005
- [38] *Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007*, http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de&dossier_id=00798