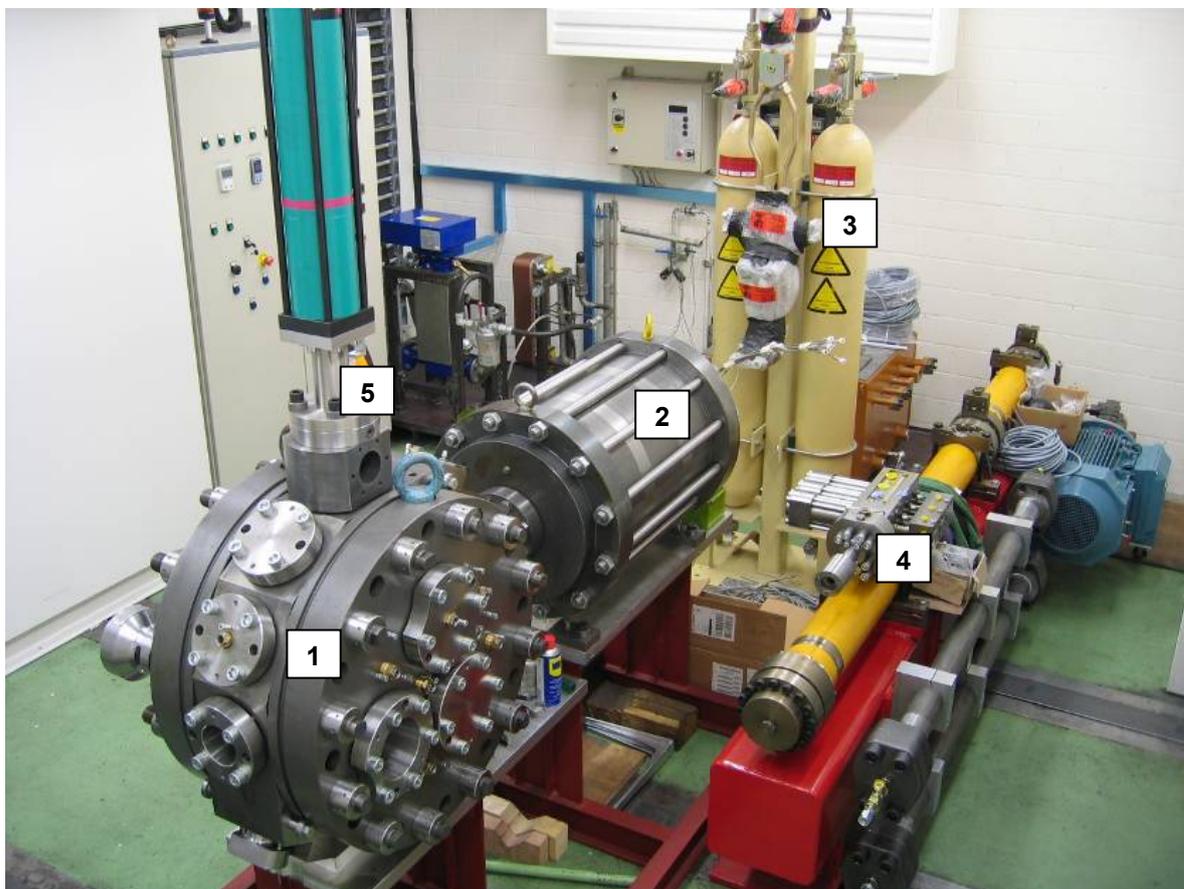


# Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

## FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Stephan Renz

renz.btr@swissonline.ch



### ***Versuchsstand für Verbrennungssystem grosser 2-Takt Schiffsdieselmotoren***

Für das durch die EU geförderte Projekt **HERKULES** [3] wurde bei Wärtsilä Schweiz in Oberwinterthur ein Versuchsstand entwickelt. (1) Versuchsträger als Brennraum grosser 2-Takt Dieselmotoren; (2) Verbrennungsluftvorwärmung; (3) Druckluftflaschen für die komprimierte Verbrennungsluft; (4) Einspritzsystem für Drücke bis 1200 bar; (5) Auslassventil.

## Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Nutzung der fossilen Energieträger Heizöl und Erdgas durch Verbrennung hat unsere Energieversorgung in der Vergangenheit dominiert und wird auch in Zukunft massgebend bleiben. Die Anforderungen an einen möglichst hohen Wirkungsgrad bei minimalem Schadstoffausstoss (Ziel: Null-Emissions-System) werden durch die Vorgaben der Ressourcenknappheit sowie der Umwelt- und Gesundheitsschäden immer höher gesteckt. Die gestiegenen Energiepreise verstärken den Druck und bieten auch marktwirtschaftliche Chancen für erneuerbare Brennstoffe.

Um die Anforderungen zu erfüllen und die sich technisch konkurrenzierenden Aufgaben Wirkungsgraderhöhung und Schadstoffreduktion zu beherrschen, ist ein laufend verbessertes Verständnis für die Vorgänge und Einflussfaktoren der Verbrennung als chemischer, thermodynamischer aber auch kinetischer Prozess erforderlich. Rein empirisches Vorgehen genügt bei weitem nicht. Wichtige Instrumente sind computergestützte Berechnungsmodelle (Modellierung), optische Messverfahren (Laserspektroskopie) sowie geeignete Versuchsträger, um die theoretischen Ergebnisse zu überprüfen oder die erforderlichen Kennzahlen zu liefern. Um im weltweiten Forschungsumfeld einen Beitrag leisten zu können, ist eine Konzentration und Kontinuität in ausgewählten Themen erforderlich. Indem beispielsweise seit Jahren Institute und Labors aus dem ETH-Bereich mit Industriepartnern zusammenwirken, wurde ein international anerkannter Stand erreicht.

Damit Fortschritte erzielt werden können, muss in der Verbrennungsforschung auf zwei Ebenen gearbeitet werden. Als Basis müssen geeignete Berechnungsmodelle, Messverfahren und Versuchsträger entwickelt oder verfeinert werden, um überhaupt die komplexen Vorgänge im Verbrennungsprozess von der Brennstoffzufuhr, der Gemischbildung, der Verbrennung bis zur Rauchgasentstehung zu erfassen oder zu simulieren. Laserdiagnostik, Modellierung wie Rechencodes für die Large Eddy Simulation in der turbulenten Verbrennung oder Versuchsträger wie eine Hochdruck- Hochtemperatur-Zelle, ein Einhubtriebwerk oder ein Versuchszylinder für Schiffsdieselmotoren, der für das EU-Forschungsprojekt Herkules entwickelt wird, sind Schwerpunkte. Mit diesen Instrumenten werden auf einer zweiten Forschungsebene gezielt Veränderungen am Verbrennungssystem vorgenommen, um den Verbrennungsprozess zu verbessern, damit die erwünschten Wirkungen wie Schadstoffreduktion und Wirkungsgraderhöhung erreicht werden. Die Fokussierung des Programms Verbrennung und Feuerung richtet sich nach den Vorgaben des **Konzeptes der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007** [10].

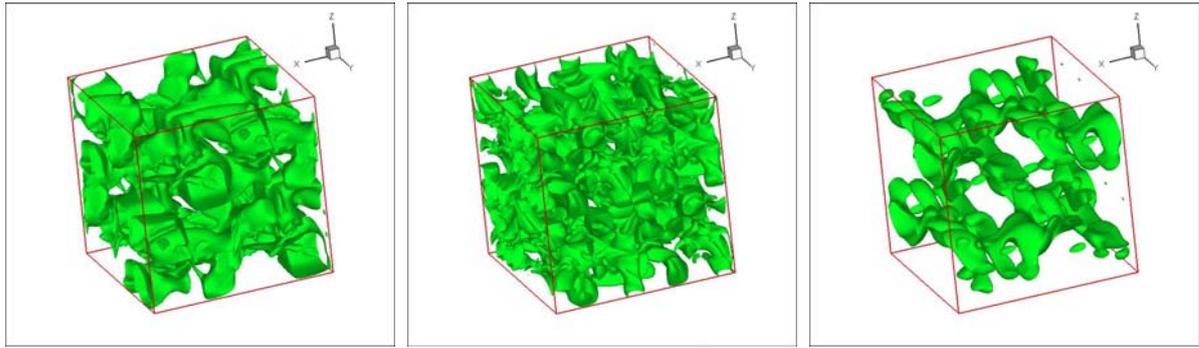
Einige bisher unter dem Programm Feuerung und Verbrennung geführte Projekte wurden ins neu gestartete Forschungsprogramm Kraftwerk 2020 übertragen. Dazu gehören vor allem gasturbinenrelevante Arbeiten.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

### ENTWICKLUNG NUMERISCHE SIMULATION, MESSMETHODEN UND VERSUCHSTRÄGER

Das Ziel des Projektes **Lattice Boltzmann Simulationenmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** [1] ist die Entwicklung von neuen effizienten Berechnungsmodellen und -programmen für komplexe physikalische und chemische Prozesse in instabilen Strömungen. Die rechnergestützte Berechnung und Darstellung der Strömungsdynamik erfolgt im Mikrometerskalenbereich. Die erforderliche Annäherung basiert auf den sogenannten Boltzmann Gitter-Modellen (Lattice Boltzmann Method) der Boltzmann kinetischen Gleichung. Sowohl die thermischen, als auch die isothermischen Modelle werden dargestellt. Im Projekt wurden bisher die folgenden Ergebnisse erreicht:

- Das Modell für Mehrkomponenten Strömungen wurde entwickelt, implementiert und getestet.
- Ein rechnerisch effizientes drei-dimensionales Modell für isotherme Strömungen wurde entwickelt und das dazugehörige effiziente Computerprogramm wurde an mehreren „benchmark“ Problemen getestet. Dieses Modell zeigt numerische Stabilität und ist deshalb sehr wichtig für höhere Reynolds- Simulationszahlen. Durch spezielle Modifikationen (zum Beispiel, Outflow Randbedingungen) ist es gelungen, effiziente Simulationen in Angriff zu nehmen.
- Ein drei-dimensionales thermisches Modell wurde weiter entwickelt und für einige „benchmark“ Strömungen getestet. (Fig. 1)
- Die Reduzierung von Variablen in Reaktionsmodellen wurde entwickelt und getestet.
- Eine alternative Beschreibung von Strömungen mit kleinerer Mach-Zahl wurde hergeleitet und numerisch getestet.



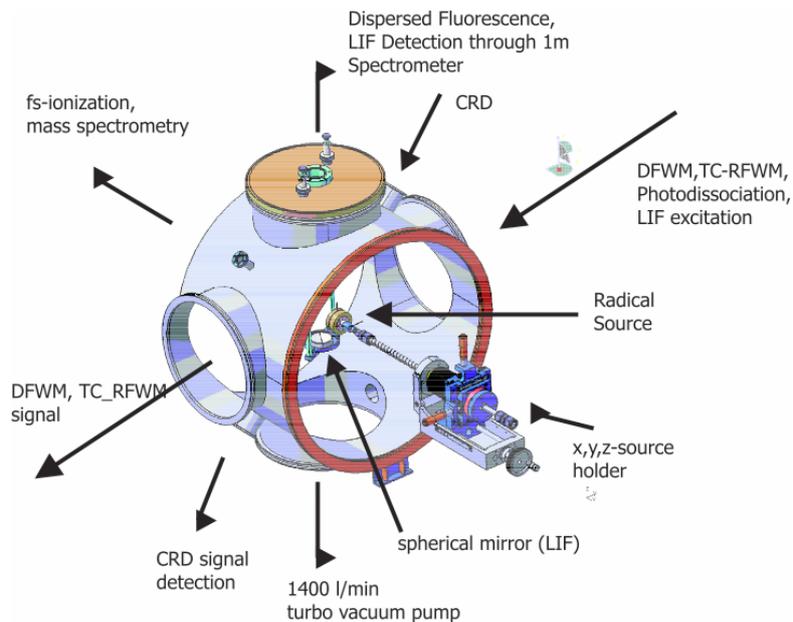
**Figur 1.** Lattice Boltzmann simulation von dreidimensionalen turbulenten Strömungen (Taylor Green vortex flow at  $Re = 5000$ )

Die theoretischen Fragen sind dabei vollständig geklärt, wie beispielsweise die stabilen Lattice Boltzmann Modelle mit grösseren Gittern, so wie die praktischen Fragen der effektiven Anwendung. Das mikroskopisch abgeleitete thermische Modell verbessert im Wesentlichen die früheren Ergebnisse der isothermen Modelle, was unter anderem mit einer neuen Klasse der exakten Lösungen bewiesen wurde. Die entwickelten sehr effizienten Modelle ersetzen kostspielige mikroskopische Simulationstechniken wie kinetisches Monte-Carlo und/oder molekulare Dynamik für niedrige Mach-Zahl und moderate Knudsen-Zahl. Die Ergebnisse wurden in zwölf Publikationen und Preprints dargestellt.

Es eröffnen sich die 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.

Der Zündvorgang von brennbaren Gemischen hat wesentlichen Einfluss auf die Schadstoffentwicklung und die Effizienz des Verbrennungsprozesses. 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** [2] wird die Rolle der Peroxylradikale in einer kalten Flamme ( $< 1000^\circ \text{K}$ ) untersucht. Diese Aufgabe ist nicht theoretisch, sondern nur im Experiment lösbar. Für die Darstellung von Peroxylradikalen wurde eine neue Molekularstrahl Apparatur konstruiert und in Betrieb genommen. (Fig. 2) Eine neuartige Radikalen-Quelle wurde installiert. Radikale können darin mit Hilfe einer einstellbaren elektrischen Gasentladung dargestellt werden. Mit einem zusätzlichen Ventil kann ein Gas dem aus der Entladungskammer strömenden Gas beigemischt werden. Damit ist es möglich, erzeugte Radikale mit neutralen Molekülen reagieren zu lassen.

Die neue Versuchseinrichtung erlaubt, lineare und nicht lineare spektroskopische Messungen gleichzeitig an Molekülen in einem Molekularstrahl durchzuführen. Das Kohlenstoff-Trimer  $\text{C}_3$  wurde simultan mit einer Zweifarben-Vier-Wellen Spektroskopie, mit Laser Induzierter Fluoreszenz (LIF) und mit Cavity Ringdown Spektroskopie (CRD) vermessen.



**Figur 2:** Versuchapparat für nichtlineare spektroskopische Messungen in einem Molekularstrahl

Die bisher durchgeführten massenspektrometrischen Versuche, um ionisierte Alkyl-Peroxy Radikale nachzuweisen, waren erfolglos. Evtl. gelingt dieser Nachweis nicht, da Peroxy-Ionen, wie vermutet wird, keinen stabilen Ionenzustand aufweisen. Der Beweis für diese Vermutung oder deren Gegenteil konnte noch nicht schlüssig erbracht werden. Weitere Versuche, die am PSI an der Chemical Dynamics Beamline am SLS-Synchrotron durchführen werden, sollen Klarheit schaffen. Femtosekunden-Spektroskopien wurden auf Di-Terbutyl angewandt. Die erhaltenen Signale können auf Anhieb noch nicht interpretiert werden. Die Forscher des PSI rechnen mit einem grösseren Aufwand, um Dissoziationsprozesse zustandsspezifisch angehen zu können.

Die nun zur Reife gebrachte Photo-Fragmentation-Excitation (PHOFEX) sowie die fs-Vierwellen-Methode (fs-CARS) wird weiterhin auf  $H_2CO$  und  $HCO$  angewendet. Diese Arbeit wird im Rahmen von zwei Doktorandenarbeiten vom SNF unterstützt. Zudem werden die Messmethoden im Hinblick auf die kommenden Peroxy Untersuchungen weiterentwickelt und modifiziert.

Im EU-Projekt **HERCULES** (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships) [3] werden neue Technologien in Bezug auf grosse Schiffsdieselmotoren entwickelt. Schweizer Partner sind *Wärtsilä/CH*, *ABB Turbosystems*, das LAV der ETHZ, das PSI und die EMPA. Ein Teilprojekt befasst sich mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für dessen Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Ein Beitrag des LAV in Zusammenarbeit mit Wärtsilä umfasst die Entwicklung eines experimentellen Versuchsträgers, der das Verbrennungssystem grosser 2-Takt-Schiffsdieselmotoren unter Berücksichtigung der charakteristischen Bedingungen weitestgehend repräsentieren soll. Damit wird es möglich sein, die benötigten Referenzdaten für die Simulationsmodelle zu generieren.

Die Entwicklung des bei Wärtsilä Schweiz in Oberwinterthur aufgebauten neuen Versuchstandes hat im Berichtsjahr entscheidende Fortschritte gemacht. Zunächst konnte die Zusammenstellung des Prüfstandes um die noch fehlenden Elemente, Komponenten und periphere Geräte ergänzt werden, wobei sich insbesondere auch der komplexere Zusammenbau des Prozessgas-Aggregates erfolgreich abschliessen liess. Ferner wurden die unverzichtbaren Umbauten in Form eines eigenen Laborgebäudes durchgeführt, welches den spezifischen Anforderungen (Sicherheitsbeplankung und Überdruckklappen) des nicht ganz ungefährlichen Experimentes genügt. Ein wesentlicher Aspekt bestand auch in der Ausführung des unentbehrlichen und hinsichtlich schiffsdieselmotorischer Verbrennung realistischen Einspritzsystems, inklusive Nebenaggregate, Brennstoffkonditionierung sowie dessen Ansteuerung. Außerdem sind grösste Anstrengungen in Bezug auf die relativ komplexe Steuerung der Anlage unternommen worden. Dies bezieht sich auf einen reibungsfreien und flexiblen Betrieb unter Berücksichtigung aller Sicherheitsaspekte, auf die Evaluation der elektrischen Schaltschränke bis hin zur Entwicklung spezifischer elektronischer Komponenten sowie auf sämtliche Vorarbeiten im Hinblick auf die geplanten messtechnischen Untersuchungen.

Die Inbetriebnahme der Versuchsanlage (Fig. 3) soll im 2007 erfolgen. Aufgrund der Komplexität der einzelnen Teilsysteme wird mit einer längeren Testphase gerechnet. Der Projektabschluss wurde in Absprache mit den Projektpartnern und der EU auf den Herbst 2007 verschoben. Danach werden die Forschungspartner einen auch nach internationalen Massstäben einzigartigen Prüfstand verfügen um ihre Wettbewerbsfähigkeit auf diesem Gebiet zu erhöhen.

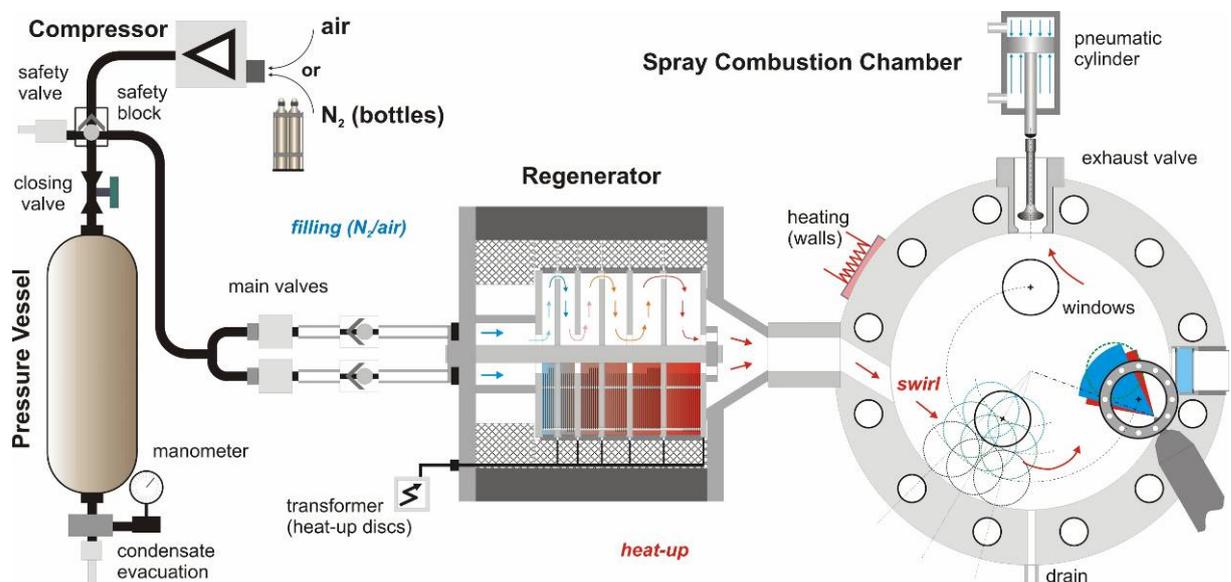


Fig.3: Schema der gesamten Versuchseinrichtung mit Darstellung der Aufheizphase

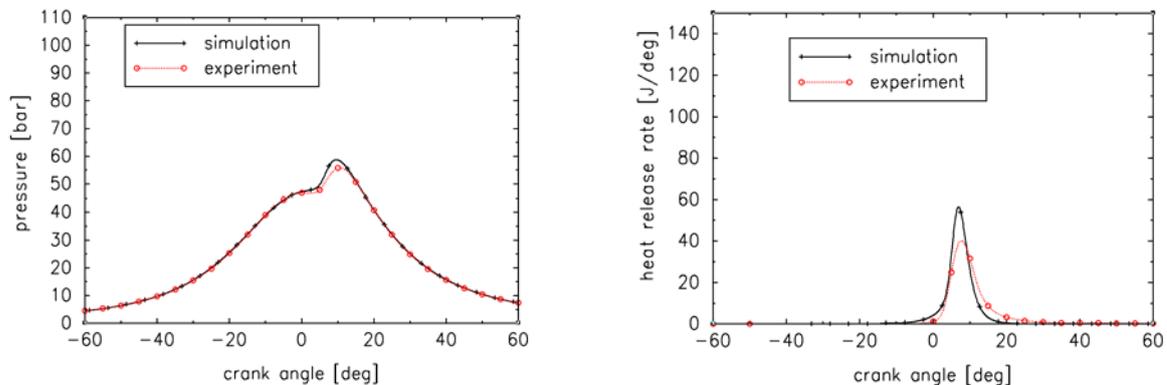
## ERHÖHUNG UMWANDLUNGSEFFIZIENZ UND SCHADSTOFFREDUKTION

Für die zukünftige Gestaltung von emissionsarmen und umwandlungseffizienten Brennverfahren ist die gezielte Abstimmung der Kraftstoffeigenschaften mit den Anforderungen des Motorbetriebs in der jeweiligen Anwendung von grosser Bedeutung. Dabei liegt der Schwerpunkt auf realisierbaren Mehrkomponentenkraftstoffen – und zwar entweder auf herkömmlichen oder solchen, die im Sinne eines „designer-fuel“ entsprechend konfiguriert werden können. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der selbstgezündeten, im Idealfall homogenen Dieselverbrennung (HCCI-Systeme) stehen im Zentrum des Interesses der motorischen Brennverfahrensentwicklung.

Dem Potential nach Reduktion der Stickoxid- und Russpartikelemissionen bis gegen null stehen Herausforderungen gegenüber, welche mit der typischerweise äusserst schnellen Energieumsetzung und dem damit einhergehenden Lärm, aber auch mit der Schwierigkeit, den Verbrennungsbeginn – in Abwesenheit von externer Zündung bzw. später Kraftstoffeinspritzung – im ganzen Kennfeldbereich kontrollieren zu können. Insbesondere bei höheren Lasten – und eher bei niedrigen Drehzahlen – kommt die Selbstzündung üblicherweise zu früh mit schwerwiegenden Konsequenzen für Spitzendruck, thermodynamischen Wirkungsgrad usw. Zusätzliche Schwierigkeiten ergeben sich aus dem instationären Betrieb für den Fahrzeugantrieb und den von Zylinder-zu-Zylinder streuenden thermischen bzw. thermochemischen Daten ( $T$ ,  $\lambda$ , AGR).

Im Projekt **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** [4] werden Ansätze zur Simulation homogener kompressionsgezündeter Brennverfahren sowie experimentelle Ergebnisse zu den Grundlagen der Selbstzündung von n-Butan und n-Heptan in einem optisch zugänglichen Einhubtriebwerk (EHT) vorgestellt. Die Arbeit hat folglich einen rechnerischen sowie einen experimentellen Teil. Eine Kernaufgabe der Simulation ist die Reduktion von detaillierten zu skelettartigen Reaktionsmechanismen. Die Mechanismen weisen eine hervorragende Übereinstimmung mit der detaillierten Chemie in einem breiten Bereich von  $\lambda$  und  $\epsilon$  auf. Im weiteren wurden die Mechanismen für verschiedene Kraftstoffqualitäten (Cetanzahlen) optimiert. Diese Arbeit stellt zwei Ansätze für die Simulation der Verbrennung vor. Das erste Modell ist ein stochastisches Mehrzonenmodell. Es berücksichtigt die Existenz verschiedener Zonen im Brennraum, die eine stochastische Initialisierung der Temperatur und des Luftkraftstoffverhältnisses um einen Mittelwert aufweisen. Das Modell zeigte eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment innerhalb der Messunsicherheiten. (Fig. 4) Das zweite in dieser Arbeit präsentierte Konzept ist ein dreidimensionales strömungsmechanisches Modell, gekop-

pelt mit reduzierter Reaktionskinetik und einem CMC-Ansatz für die Schliessung der Interaktion zwischen Turbulenz und Chemie. Das Modell zeigte eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment und hat sich z.B. als fähig erwiesen, auch die grosse Sensitivität der Verbrennung auf kleinste Änderungen der Abgasrückführung (AGR), wenn sehr hohe AGR-Raten verwendet werden, wiederzugeben.



**Figur 4:** Vergleich des berechneten Druckverlaufs (links) bzw. der Wärmefreisetzung (rechts) mit den Messungen für Betriebspunkt 1 ( $n = 1200$  U/min, 20 Temperaturzonen, 10 Lambdazonen,  $\lambda = 3.8$ ,  $\sigma_T = 2.5$  K,  $\sigma_\lambda = 0.05$ , n-Butan, reduz. Mechanismus,  $\alpha_{scaling} = 0.5$ )

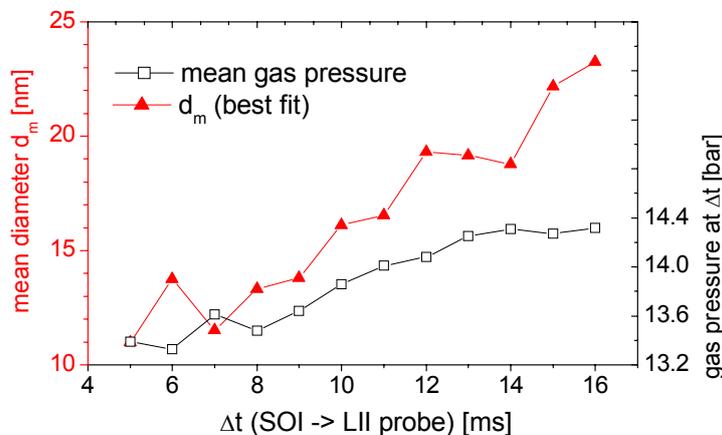
Im experimentellen Teil der Arbeit wurden unter definierten Zuständen ( $\lambda$ ,  $p$ ,  $T$ , AGR) die thermodynamischen Zustände im Brennraum bei Zündung sowie die Lokalität der Zündung für die Kraftstoffe n-Butan, n-Heptan sowie kombinierte Einspritzungen von n-Butan und Diesel untersucht. Von speziellem Interesse war die Lage sowie die Beeinflussung der sog. Tieftemperatur Reaktion (LTR) und Hochtemperatur Reaktion (HTR) in Abhängigkeit von diversen Betriebsparametern. Die Grundlagenuntersuchungen der homogenen Kompressionszündung wurden an einem sehr flexiblen und optisch gut zugänglichen Einhubtriebwerk durchgeführt. Der Vergleich zwischen Experiment und den innerhalb des numerischen Teils der Arbeit entwickelten Reaktionsmechanismen für n-Butan zeigten eine gute Übereinstimmung. Mit den Resultaten sind bessere Aussagen zur Selbstzündung von homogenen Gemischen in motorischen Anwendungen in Abhängigkeit von verschiedenen Betriebsparametern möglich, insbesondere im Hinblick auf die Validierung von Simulationsalgorithmen. Darüber hinaus haben die Messungen und die Berechnungen einen wesentlichen Beitrag zum vertieften Verständnis der Grundlagen der motorischen HCCI-Verbrennung geleistet.

Im Projekt **Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures** [5] empfindliche und quantitative optische Messverfahren weiter entwickelt um die innermotorische Entwicklung der Russpartikelgrösse bei der Dieselverbrennung möglichst on-line und in-situ im Verbrennungsraum zu beobachten. Hierdurch wird ein besseres Verständnis der Russbildung und Russoxidation als Funktion verschiedener Betriebsparameter der Einspritzzelle, d.h. Verbrennungsbedingungen erwartet. Im laufenden Projekt werden dazu Experimente, hauptsächlich mittels in-situ bildgebender optischer Methoden zur Visualisierung zweidimensionaler Russ- und Flammenfront-Verteilungen, in einer Hochtemperatur-Druckzelle unter den Bedingungen Diesel-motorischer Verbrennung ausgeführt. Neben einer hohen örtlichen und zeitlichen Auflösung der betrachteten Vorgänge liefern die angewendeten Verfahren auch quantitative Informationen beispielsweise über Temperatur, Partikelgrössen oder gemessene Konzentrationen.

Zur Bestimmung der mittleren Partikelgrössen von Russ während der Diesel-Verbrennung setzt das PSI die Methode der zeitaufgelösten Laser-Induzierten Inkandeszenz, kurz LII, an der am PSI betriebenen Hochdruck-Einspritzkammer ein. Das 2-Farben LII Experiment zur in-situ Bestimmung der Russpartikelgrösse und simultaner Registrierung räumlich aufgelöster Russemissions-Spektren wurde weiter verbessert. Transiente LII-Signale wurden zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einspritzbeginn bei Gegendrücken zwischen 1 und 3.5 MPa und bei Einspritzdrücken von 50-130 MPa aufgezeichnet.

Das Abkühlverhalten der laser-aufgeheizten Partikel wurde durch Lösung der Transportgleichungen für Masse und Energie berechnet und die ermittelte LII-Signalintensität in einem „least-squares“ Verfahren unter Einsatz eines geeigneten thermo-physikalischen Modells an experimentelle LII-Abklingkurven angepasst. Die Auswertung ergab mittlere Partikeldurchmesser der Russteilchen zwi-

schen 10-20 nm, je nach Gasdruck, Einspritzdruck sowie dem Zeitpunkt nach Einspritzbeginn, (5-16 ms). Insbesondere zeigte sich, dass bei einer eingestellten Gastemperatur von 773 K, einem Gasdruck von ca. 1.35 MPa und einem Einspritzdruck von 50 MPa der mittlere Partikeldurchmesser mit der Brenndauer kontinuierlich von ca. 10 nm auf 20 nm zunimmt. Unter den gegebenen Bedingungen wachsen demnach die Russteilchen noch 16 ms nach Einspritzbeginn. (Fig. 5)



**Figur 5:** Zunahme der mittleren Partikeldurchmesser der Russteilchen (Dreiecke) und mittlerer Gasdruck (Quadrate) als Funktion der Zeit zwischen Einspritzbeginn und LII Laserpuls

Um den Einspritzvorgang unter veränderten Betriebsbedingungen detaillierter untersuchen zu können, wurde zudem eine kombinierte Messanordnung aufgebaut, welche die simultane Aufzeichnung von Schattenwurf- und Schlierenaufnahmen mit 2 separaten Kameras bei hoher zeitlicher Auflösung erlaubte.

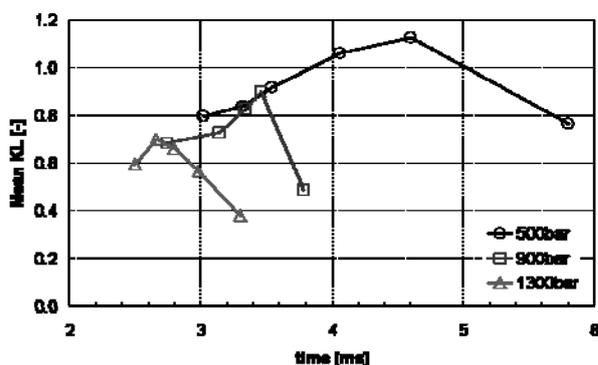
Um bei Gasturbinenprozessen den Wirkungsgrad weiter zu erhöhen ( $\eta > 60\%$ ) und die Emissionen noch stärker zu reduzieren ( $\text{NO}_x < 10\text{ppm}$ ) müssen auch neue Brennverfahren untersucht werden. Im nun abgeschlossenen Projekt **Partial Catalytic Oxidation of CH<sub>4</sub> to Synthesis Gas for Power Generation Application** [6] wurde die viel versprechende katalytisch unterstützten Verbrennungsverfahren, die auf grundsätzlich neuen Brennstoff-Umwandlungsverfahren basieren, geprüft. Dabei wurde die partielle katalytische Oxidation (PCO) von Methan zu Synthesegas ( $\text{H}_2$  und  $\text{CO}$ ) unter gasturbinen-relevanten Bedingungen über einem Rhodium-Katalysator experimentell und numerisch im Druckbereich von 4 bis 10 bar untersucht. Das zugeführte Methan-Sauerstoff-Gemisch wurde mit grossen Mengen von  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  verdünnt (bis zu 70 Vol.-Prozent), um neue Stromerzeugungszyklen zu simulieren, welche mit einem hohen Grad von Abgas-Rückführung arbeiten. Experimente wurden in einem optisch zugänglichen Kanalströmungs-Reaktor durchgeführt, der in situ Messungen mit Lasermesstechniken erlaubt, sowie in einem massstäblich verkleinerten katalytischen Gasturbinen-Reaktor. Voll elliptische zweidimensionale numerische Codes für stationäre und transiente Fälle wurden benutzt. Sie enthalten chemische Reaktionsschemata für heterogene und homogene Elementarreaktionen. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Heterogene (katalytische) und homogene (Gasphasen-) Reaktionsschemata wurden validiert für die partielle katalytische Oxidation von Methan mit einem hohen Grad von Abgasrückführung.
- Die Auswirkungen von zugefügtem  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  wurden aufgeklärt. Das zugefügte  $\text{H}_2\text{O}$  erhöhte den Grad der Methan-Umsetzung und die Selektivität für Wasserstoff, während die  $\text{CO}$ -Selektivität vermindert wurde. Die Auswirkungen von zugefügtem  $\text{CO}_2$  auf die Chemie (trockene Reformierung) waren minimal.
- Das numerische Modell reproduzierte die gemessenen katalytischen Zündzeiten. Des weiteren wurde gezeigt, dass die chemische Auswirkung von  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  auf die katalytischen Zündverzugszeiten minimal war.
- Die Dispersion des Edelmetalls nahm mit verschiedenen Trägermaterialien zu, und zwar in der Reihenfolge  $\text{Rh}/\text{a-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Rh}/\text{ZrO}_2$ , und  $\text{Rh}/\text{Ce-ZrO}_2$ . Es wurde eine offensichtliche Beziehung zwischen der Dispersion des Edelmetalls und dem katalytischen Verhalten gefunden.

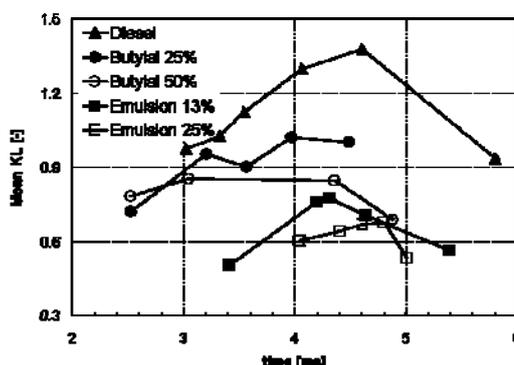
Mit seiner PCO-Fachkompetenz nimmt das PSI zusammen mit 10 europäischen Partnern am EU-Projekt Advanced Zero Emission Power teil.

Beim Einsatz berührungsloser optischer Messverfahren wird eine Analyse der Verbrennungsprozesse benötigt, um ein Verständnis für die Russbildung und der dabei einhergehenden Oxidationsprozesse zu erlangen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden im Projekt **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** [7] experimentelle Untersuchungen in einer Hochtemperatur- und Hochdruckzelle HTDZ am LAV der ETH Zürich durchgeführt. Zur Untersuchung der Russbildung bei transienten Dieselstrahlen wurden die beiden laseroptischen Verfahren Mehrwellenlängenpyrometrie und „back diffused laser technique“ (BDL) simultan angewandt. Basierend auf dem aufgezeichneten Drucksignal und dem detektierten Flammenlicht wurde eine Analyse zur Identifizierung des Zündverzugs, der Dauer der Vormischverbrennung, des Einsatzes der diffusiven Verbrennung und der gesamten Brenndauer durchgeführt. Zum Einsatz kamen ein Referenzdieselmotorkraftstoff, sowie unterschiedliche Zumischungen von Butylal (sauerstoffhaltig) und Wasser-Dieselemlusionen. Der Einspritzdruck wurde variiert und sowohl der eingespritzte Massenstrom, die Zelltemperatur als auch der Zelldruck vor dem Einspritzen wurden konstant gehalten. Die Bildung von „Particulate Matter“ (PM) Emissions wurde unter gleichen Bedingungen untersucht.

Obwohl die nach dem Pyrometerverfahren berechneten KL-Faktoren (ein Mass für die Russkonzentration) höher sind als die des BDL Verfahrens, sind der Trend der mittleren KL-Faktoren und deren zeitlichen Integration nach dem Einspritzen für beide Verfahren ähnlich. Darüber hinaus wurde der Einfluss des Einspritzdruckes untersucht, wobei die eingespritzte Kraftstoffmasse konstant gehalten wurde. Es zeigt sich, dass eine Änderung des Einspritzdruckes von 500bar bis 900bar einen Abfall der mittleren Temperatur und des volumetrischen Anteiles der Russwolke bewirkt. Von 900bar bis 1300bar bleibt sowohl die mittlere Temperatur als auch die Wärmeabgabe konstant, während das Maximum des volumetrischen Russanteiles zu höheren Werten tendiert jedoch unter höheren Oxidationsraten. (Fig. 7) Zuallerletzt wurde der Einfluss der Brennstoffeigenschaften untersucht unter Einsatz folgender Brennstoffzusammensetzungen: Diesel, zwei Mischungen (25% und 50% nach Masse) mit sauerstoffangereichertem Dieselzusatz (Butylal) und zwei Wasser-Diesel Emulsionen (13% und 25% nach Masse). Pyrometerergebnisse zeigen auf, dass die mittlere Temperatur der Russwolke als eine Funktion des Brennstoffgemisches abfällt mit folgender Reihenfolge: Diesel, Butylal-Diesel 25%, Butylal-Diesel 50%, Wasser-Diesel Emulsion 13% und 25%. Sowohl der KL-Faktor als auch dessen zeitliche Integration zeigen den gleichen Trend auf. (Fig. 8) Butylal beinhaltet Sauerstoff und weist im Vergleich zum Diesel eine höhere Cetanzahl (CN) auf. Die höhere Konzentration von Sauerstoff im Gemisch ermöglicht eine bessere Russoxidation. Emulsionen beinhalten Wasser, dass die Flammtemperatur herabsetzt und den Zündverzug vergrößert. Der Kühlungseffekt des verdampfenden Wassers hängt vom eingespritzten Wasseranteil im Gemisch ab. Die Tröpfchenverdampfung des Wassers bewirkt eine sekundäre Atomisierung und begünstigt damit die Vermischung von Luft und Brennstoff. Die gewonnenen Ergebnisse werden eingesetzt um derzeitige Modellierungen der Verbrennungsvorgänge in Dieselmotoren im Hinblick auf Russbildung und Oxidationsvorgänge zu erweitern. Die im Rahmen dieses Projektes aufgebaute experimentelle Datenbank wird auch internationalen Partnern zur Verfügung gestellt.



**Figur 7:** Gemittelte KL-Faktoren mit Diesel bei verschiedenen Einspritzdrücken



**Figur 8:** Gemittelte KL-Faktoren bei verschiedenen Treibstoffen

## Nationale Zusammenarbeit

Die in den vergangenen Jahre aufgebaute und bewährte Zusammenarbeiten innerhalb der Forschungsinstitute des ETH-Bereichs wie auch zur Industrie wurde im 2006 weiterhin in zahlreichen Projekten erfolgreich genutzt und fortgeführt. So wurde beispielsweise im vom Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) der ETHZ bearbeiteten Projekt **Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** [1] eng mit der Gruppe für Grundlagen der Verbrennung des PSI zusammengearbeitet. Im Berichtsjahr wurde daraus innerhalb des Rahmenprogramms CCEM das gemeinsame Projekt *Computational Engineering of multiscale transport in small-scale surface based energy conversion* gestartet. Darin engagiert sind Institute und Projektgruppen der ETHZ, der EPFL, des PSI und der EMPA. Im vom LAV der ETHZ geleiteten Projekt **Darstellung des Technologiepotentials von zukünftigen Dieselmotoren Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO2 Ausstoss** [8] erfolgte eine Zusammenarbeit im Bereich der Partikelmessung mit der EMPA. Zudem wird das Projekt auch gemeinsam mit der Industrie, namentlich der Firma Liebherr Machines SA, bearbeitet und finanziert. Eine direkte Zusammenarbeit der ETHZ mit der Industrie erfolgt auch im Projekt **HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships)** [3]. Wärtsilä Schweiz (ehemals New Sulzer Diesel) ist der wichtigste Schweizer Partner in diesem von der EU mitfinanzierten Projekt. In zahlreichen Gasturbinenprojekten des PSI wird mit Alstom Power kooperiert. Auch hier erfolgt eine Mitfinanzierung durch den Industriepartner. Die Aktivitäten des Schweizerischen Vereins für Verbrennungsforschung (SVV) waren nach der grossen Tagung im 2005 [11] im Berichtsjahr eher reduziert. Die Hochschulkompetenzgruppe für Verbrennungsmotoren (HKV) [12] trifft sich jährlich zu einem gemeinsamen Informationsaustausch über die Aktivitäten der verschiedenen Hochschulen. Auch zahlreiche Fachhochschulen sowie Akteure der Industrie sind dabei vertreten.

## Internationale Zusammenarbeit

Eine intensive Kooperation zwischen schweizerischen und ausländischen Hochschulen und Industrieunternehmen erfolgt im genannten Projekt **HERKULES** [3] statt. Dieses Gemeinschaftsprojekt ist Teil des 6. EU-Forschungsprogramms [13]. Das Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme der ETHZ leitet im Arbeitspaket WP 2 Advanced Combustion Concepts im Projekt 2.1 Combustion Process Simulation das Teilprojekt 2.1.1 Test Facilities. Neben der zuvor erwähnten Zusammenarbeit mit Wärtsilä sind daran auch die Abo Akademi University (AAU), die Helsinki University of Technology (HUT), die National Technical University of Athens / LME (NTUA/LME) sowie die Wärtsilä Corporation Finnland (WFI) beteiligt. Das durch die deutsche Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [18] massgeblich mitfinanziert Projekt **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** [4] wurde dem LAV der ETHZ in einem Wettbewerb zugeschlagen. Damit wurde die Kompetenz und die internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweizer Verbrennungsforschung bestätigt.

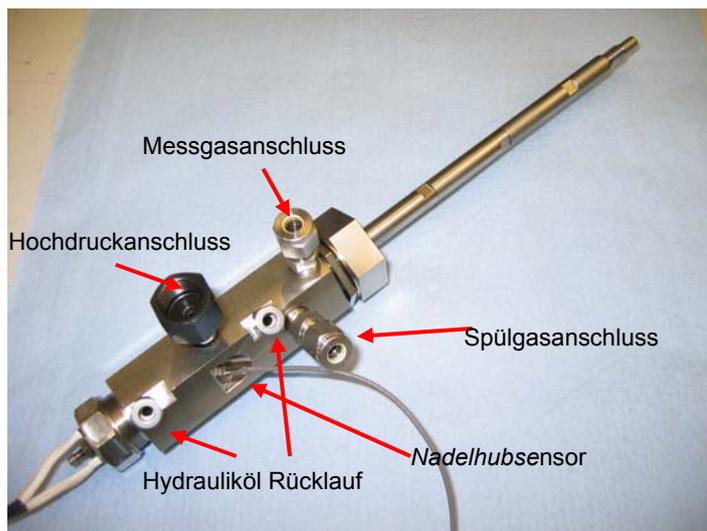
Mit über 1200 Teilnehmern, rund 300 Vorträgen und 480 Work in progress-Postern war das 31th **International Combustion Symposium** [17] 2006 in Heidelberg der grosse Treffpunkt der internationalen Forschergemeinschaft. Mit drei Vorträgen und diversen Postern war die Schweiz gut vertreten. Die u.a. vom BFE und BAW unterstützte ETH-Konferenz **über Combustion generated Nanoparticles** [14] wurde im 2006 zum 10. Mal durchgeführt. Rund 300 internationale Teilnehmer tauschten vom 21.-23. August 2006 Erfahrungen und neues Wissen zu Russpartikeln und Feinstaubemissionen aus Verbrennungsprozessen aus.

Das BFE ist Mitglied des **Executive Committee des Implementing Agreements for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion der Internationalen Energie Agentur IEA** [15]. Verschiedene von einzelnen Forschungsinstituten bearbeitete Projekte so auch des PSI sind mit der per Ende 2006 beendete Bearbeitungsperiode abgeschlossen. Neu werden Projekte in länderübergreifenden Arbeitsgruppen (Collaborative Tasks) bearbeitet. Das PSI leitet das Projekt **Sprays in Combustion**. Die mit der Einführung der Collaborative Tasks eingeleitet Neuorientierung des Implementing Agreements wurde von der IEA End-Use Working Party begrüsst und das Agreement für die Periode 2007 – 2011 erneuert.

Durch die Mitarbeit in der **Working Party for Fossil Fuels WFFF der IEA** [16] erfolgt ein verstärkter Informationsaustausch zu den für die Verbrennung nach wie vor massgebenden Implementing Agreements über die fossilen Brennstoffe. Ein Schwerpunktthema dieser Arbeiten ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen. Neben der Minderung durch die Verbesserung der Verbrennungssysteme ist auch die CO<sub>2</sub> Abscheidung und Endlagerung ein wichtiger Fokus.

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Projekt **Darstellung des Technologiepotentials von zukünftigen Dieselmotoren Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO<sub>2</sub> Ausstoss** [8] sollten Möglichkeiten, zur Reduktion der Schadstoffemissionen von „Heavy-Duty“ (Baumaschinen) Dieselmotoren ohne den Brennstoffverbrauch und damit den spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstoss zu erhöhen, untersucht werden. Der dafür vorgesehene Vierzylinder Diesel-Motor mit Vierventilkopf der Firma Liebherr konnte während der Projektlaufzeit jedoch nicht geliefert werden. Die Forschungsarbeiten beschränkten sich deshalb auf die Entwicklung und die Herstellung der Messinstrumente, der Werkzeuge für die Entnahme von Gasproben am laufenden Motor sowie der Programme zur Auswertung der Messergebnisse und zur Simulation des Verbrennungsprozesses. Das an der ETH entwickelte Entnahmeventil (Fast Sampling Valve, kurz FSV) stellte höhere Anforderungen an die Forschungs- und Entwicklungsarbeit als zunächst erwartet. Die zulässige Zeit für die Gasentnahme liegt bei 0.6 Millisekunden. Im verfügbaren Zeitfenster muss eine für die Analyse genügende Gasmenge entnommen werden und das Entnahmeventil auch wieder gespült werden können. Die Drücke von 100 bar und die Temperaturen von 500°C müssen aufgrund der engen Platzverhältnisse im Zylinderkopf des Vierventilmotor von einer Sonde mit nur 1 Millimeter Wandstärke beherrscht werden. Mit Tests an einem Versuchskörper wurde nachgewiesen, dass die gewählte Konstruktion die Anforderungen erfüllt. An der Empa wurde die Messtechnik zur nachgeschalteten Russpartikelcharakterisierung entwickelt. Das im 3-D CFD Code programmierte Simulationsmodell für die Abbildung der Russsimulationen zeigt gute Übereinstimmung mit vorhandenen Messungen. Damit ist die Ausrüstung für die konkrete Projektarbeit vorbereitet. Die Lieferung des Versuchsmotors, der für die US-Abgasnorm Tier 3 zertifiziert sein wird, ist per 2007 vorgesehen. Das Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme plant daran in einer Industriekooperation das Potential zur Erfüllung der US-Abgasnorm Tier 4, die im 2011 eingeführt wird, aufzuzeigen. Die zulässigen Emissionen NO<sub>x</sub> und PM (Partikel) liegen bei Tier 4 um Faktor 10 tiefer als bei Tier 3.



**Figur 1:** Zusammengebaute Entnahmesonde mit Bezeichnung der erkennbaren Anschlüsse.

Die Reduktion der CO<sub>2</sub> Emissionen gehört im Hinblick auf verschärfte Grenzwerte zu den Schlüsselaufgaben bei der Entwicklung neuer Fahrzeugmodelle. Neben der Verminderung des Treibstoffverbrauchs durch optimierte Verbrennungssysteme weisen insbesondere verbesserte Antriebskonzepte ein wesentliches Einsparpotential auf. Damit die Fahrzeuge schlussendlich auch marktfähig sind, muss das Beschleunigungsverhalten als Kriterium mitberücksichtigt werden. Der dadurch entstehende Trade Off zwischen „Sparsamkeit“ und „Sportlichkeit“ kann nur durch technische Innovationen überwunden werden, wovon die Hybrid Antriebe (Verbrennungs- und Elektromotor) aus aktueller Sicht sicherlich das grösste Potential aufweisen. Hybrid Antriebssysteme sind komplex und können in vielen unterschiedlichen Varianten realisiert werden. Es ist daher unumgänglich, dass diese Varianten schon in der Konzeptphase mit einem guten Simulationswerkzeug unter möglichst realistischen Bedingungen untersucht werden können.

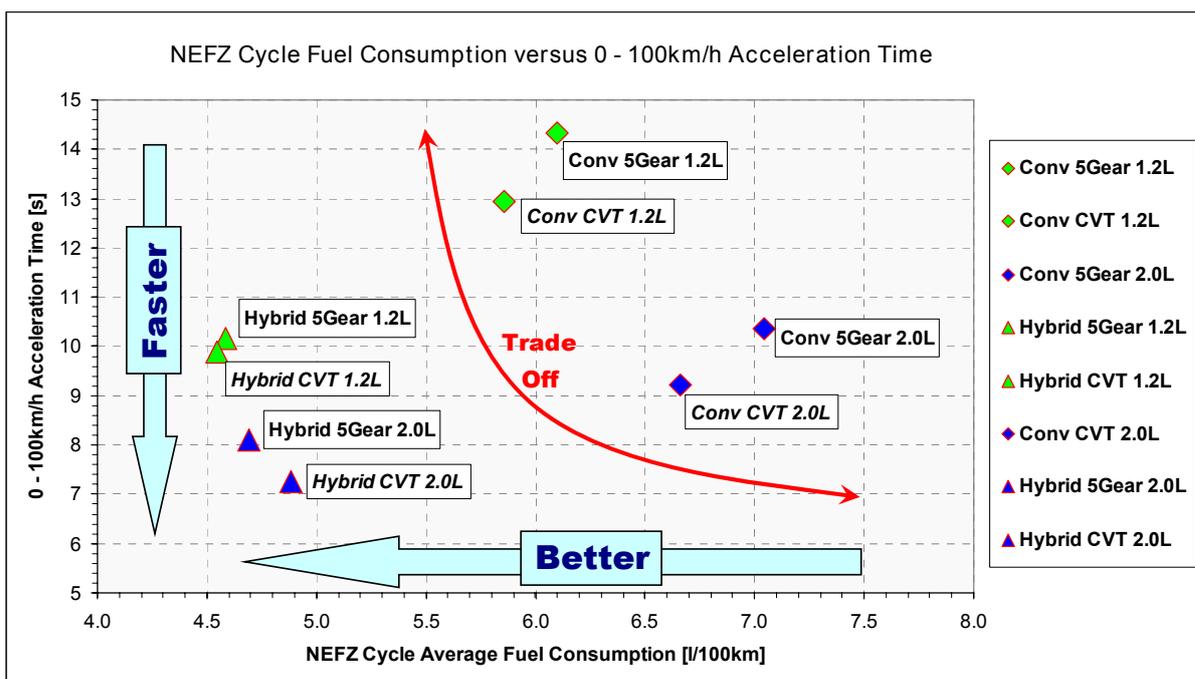
Im Projekt **Massnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** [9] wurde ein Simulationswerkzeug erarbeitet, mit dem verschiedene Antriebssysteme

bereits in der Konzeptphase unter möglichst realistischen Bedingungen untersucht werden können. In einer Bibliothek sind alle relevanten Komponenten von Fahrzeugen mit oder ohne Hybrid Antrieb abgelegt. Damit können Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten schnell und einfach zusammengestellt und auf virtuellen Teststrecken geprüft werden.

Der hier gewählte Ansatz unterscheidet sich grundsätzlich von anderen Simulationstools da hier das Fahrzeug direkt modelliert wird und nicht die Belastung resp. die Arbeitspunkte der Bauteile rückwärts aus dem Fahrzyklus berechnet werden. Mit dieser Methode kann das Fahrzeug auf jeder beliebigen Fahrstrecke untersucht werden, der Einfluss des „Fahrers“ wird dabei ebenso berücksichtigt wie die Auswirkung einzelner Bauteiländerungen auf das Fahr- und Verbrauchsverhalten des gesamten Fahrzeugs.

Die im Projekt wurden damit 8 unterschiedlich angetriebene, aber ansonst identische PKW's verglichen (zwei Motorgrößen, zwei Getriebetypen, mit/ohne mildem Hybrid Antrieb auf elektrischer Basis). Der Vergleich umfasste dabei nicht nur der durchschnittliche Treibstoffverbrauch im NEFZ Standardzyklus sondern auch das Beschleunigungsvermögen bei einem Sprint von Null auf 100 km/h.

Es zeigt sich, dass das gleiche Fahrzeug ohne Verlust an „Sportlichkeit“ zu einem wesentlich sparsameren Umgang mit dem Treibstoff gebracht werden kann: Ausgehend vom gewählten Basisfahrzeug (PKW der Golf/Astra Klasse) kann der Umbau des Antriebs von einem 105kW 2.0L Benzinmotor mit einem 5 Gang Handschaltgetriebe zu einem 75kW 1.2L Benzinmotor + 30kW Elektromotor/Generator mit einem CVT Getriebe den Treibstoffverbrauch im NEFZ Fahrzyklus um 35% reduzieren! (Von 7.0 l/100km auf 4.5 l/100km) Gleichzeitig verbessert sich die Sprintzeit auf 100 km/h mit dem Hybrid-Antrieb (Booster Betrieb mit beiden Antrieben) um 5% (von 10.4s auf 9.9s).



Figur 12: „Trade Off“ zwischen Treibstoffverbrauch und Beschleunigungszeit von Null auf 100km/h.

## Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Das Berichtsjahr war organisatorisch durch den Wechsel der Bereichs- und Programmleitung im BFE Forschungsprogramm Feuerung und Verbrennung geprägt. Bedingt durch die Pensionierung von Dr. A. Hintermann wurde die Bereichsleitung an F. Rognon (BFE interner Bereichleiter) und die Programmleitung an St. Renz (BFE externer Programmleiter) übergeben. Dr. A. Hintermann unterstützte die Forschungsaktivitäten in der Schweiz seit 1988 durch gezielte Förderung von hochstehenden Fachkompetenzen und Versuchseinrichtungen wie die numerische Simulation, die Laserdiagnostik und die Entwicklung von Versuchsträgern insbesondere an der ETH und am PSI. Damit wurde einerseits die internationale Konkurrenzfähigkeit in ausgewählten Bereichen gestärkt

was beispielsweise durch die Partizipation an Forschungsprojekten der EU oder des FVV, der IEA sowie mit zahlreichen Beiträgen am renomierten International Symposium on Combustion bestätigt wurde. Aus der Zusammenarbeit mit der Industrie entstanden konkrete Lösungen und Produkte mit dem Fokus der Verbesserung der Energieumwandlungseffizienz und der Reduktion der Schadstoffemissionen.

Auf die laufenden Projekte hatte der Wechsel der Programmleitung keinen Einfluss. Sie wurden weitgehend wie geplant fortgeführt. Im Projekt **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** konnten die ionisierten Alkyl Peroxyl Radikale noch nicht wie gewünscht nachgewiesen werden. Mit der Möglichkeit an der am PSI ab 2007 zur Verfügung stehenden Chemical Dynamics Beamline am SLS Synchrotron weitergehende Versuche durchzuführen, werden verbesserte Erkenntnisse erwartet. Durch die ausstehende Lieferung des Versuchsmotors konnten im Projekt **Darstellung des Technologiepotentials von zukünftigen Dieselmotoren Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO<sub>2</sub> Ausstoss** [8] die konkreten Versuche noch nicht durchgeführt werden. Der Aufbau des komplexen Versuchsträgers im Projekt HERCULES ist weitgehend abgeschlossen. Die im 2007 vorgesehenen Tests zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Gesamtsystems werden mit grossem Interesse erwartet.

Neben den vorgenannten Arbeiten werden für das Jahr 2007 folgende Schwerpunkte gesetzt.

- Projektinitiierung für die Periode 2008 – 11 gemäss den Vorgaben des neuen Energieforschungskonzepts des Bundes [10]
- Verstärkte Integration der Fachhochschulforschung ins Programm
- Stärken der Netzwerke zwischen den Forschungsinstitutionen und der Industrie
- Prüfung des Standes der Forschung im Bereich Feuerung
- Initiieren einer gemeinsamen Fachtagung mit den Akteuren im Bereich Feuerung und Verbrennung
- Realisierung der Webseite des Programms Feuerung und Verbrennung auf der Homepage des BFE

## Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) unter den angegebenen Publikationsnummern in Klammern)

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

- [1] I. V. Karlin ([karlin@lav.mavt.ethz.ch](mailto:karlin@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Lattice Boltzmann Simulationenmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** (JB).
- [2] T. Gerber et al., ([thomas.gerber@psi.ch](mailto:thomas.gerber@psi.ch)) PSI-Villigen: **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** (JB).
- [3] K. Hermann ([hermann@lav.mavt.ethz.ch](mailto:hermann@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber** (JB).
- [4] A. Escher, ([escher@lav.mavt.ethz.ch](mailto:escher@lav.mavt.ethz.ch)), K. Boulouchos ([boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** (JB).
- [5] T. Gerber ([thomas.gerber@psi.ch](mailto:thomas.gerber@psi.ch)) et al. PSI-Villigen: **Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressure** (JB).
- [6] I. Mantzaras ([ioannis.mantzaras@psi.ch](mailto:ioannis.mantzaras@psi.ch)) et al. PSI-Villigen: **Partial Catalytic Oxidation of CH<sub>4</sub> to Synthesis Gas for Power Generation Application** (SB).
- [7] K. Boulouchos ([boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** (SB).

## Liste der P+D-Projekte

- [8] K. Boulouchos ([boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO<sub>2</sub>-Ausstoss** (SB).
- [9] K. Boulouchos ([boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)), LAV/ETH-Zürich: **Massnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** (SB).

## Referenzen

- [10] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, [http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de&dossier\\_id=00798](http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de&dossier_id=00798)
- [11] Tagungsunterlage **SVV-Tagung** vom 30. September 2005.

- [12] **Hochschulkompetenzgruppe Verbrennungsmotoren** c/o J. Czerwinski, Abgasprüfstelle und Motorenlabor (AFHB), Hochschule für Technik und Informatik HTI, Biel ([Jan.Czerwinski@bfh.ch](mailto:Jan.Czerwinski@bfh.ch))
- [13] 6. Rahmenprogramm für Forschung und Entwicklung der EU <http://cordis.europa.eu/fp6>
- [14] A. Mayer, TTM ([ttm.a.mayer@bluewin.ch](mailto:ttm.a.mayer@bluewin.ch)), Ed., Proc. 9<sup>th</sup> **ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles**, August 2005
- [15] IEA Internationale Energieagentur <http://www.iea.org>
- [16] WPPF Working Party for Fossil Fuels der IEA <http://www.iea.org>
- [17] International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh USA; <http://www.combustioninstitute.org>
- [18] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen FVV; <http://www.fvv.de>