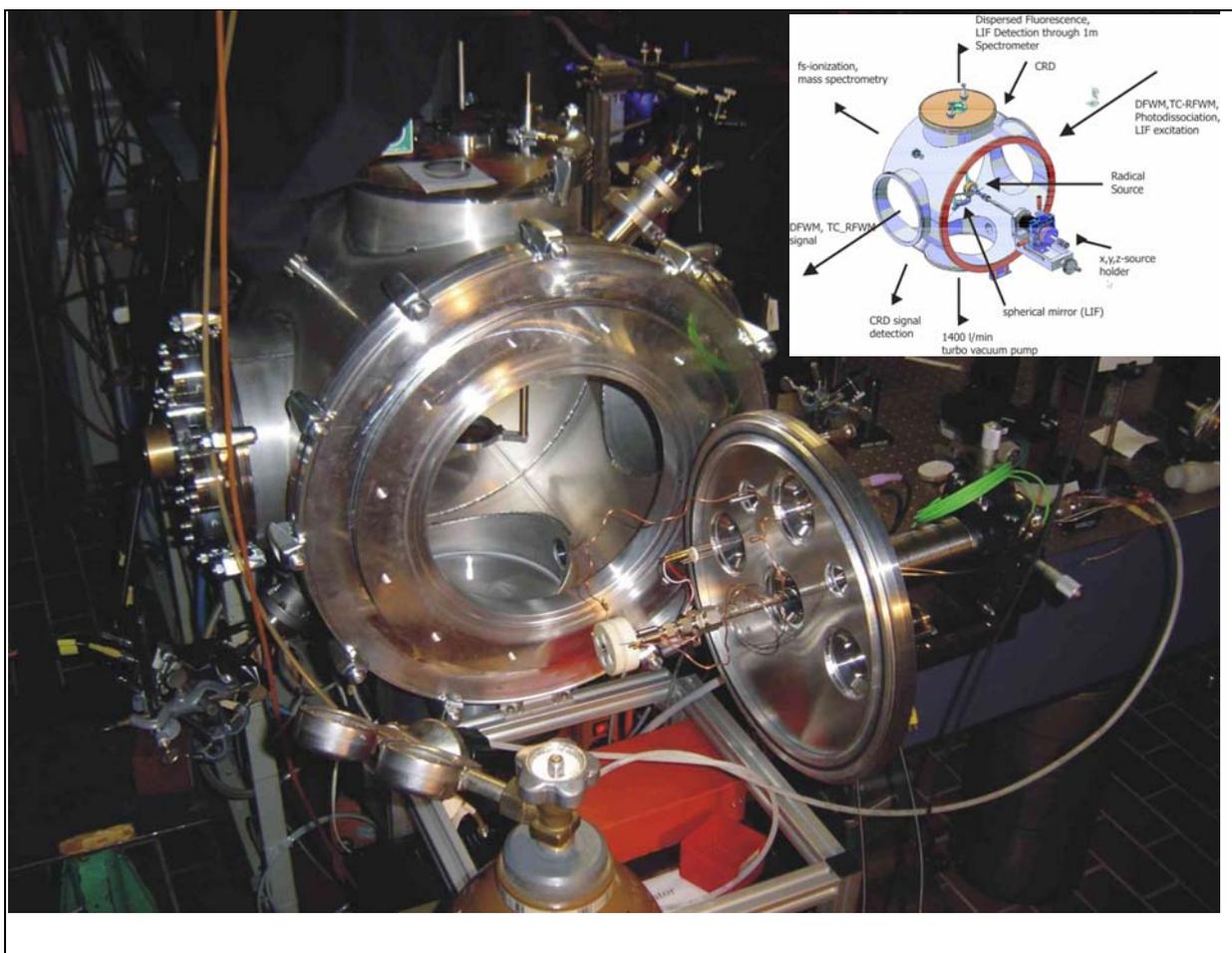


Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2007

FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Stephan Renz

renz.btr@swissonline.ch



Interaktionskammer für Untersuchungen im Molekularstrahl im Vakuum

Für die Untersuchung der Peroxy Radikalen im Zündvorgang wurde im Projekt ***Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion*** [2] eine Apparatur entwickelt. Die Molekularstrahlquelle ist auf einer XYZ Translationsbasis mit Vakuumdurchführung montiert, so dass sie während des Betriebes justiert werden kann. Die Quelle ist heizbar, damit auch bei Raumtemperatur flüssig oder sogar fest vorliegende Stoffe in den Molekularstrahl eingebracht werden können. Die Interaktionskammer wurde im 2007 auf einem neu errichteten Versuchstand an der Swiss Light Source (SLS)-Beamline des Paul Scherrer Instituts in Villigen aufgebaut.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die in den letzten Jahren erfolgte und gegen Ende 2007 noch akzentuierte Erhöhung der Preise für fossile Energieträger hat Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und die Auswahl an Brenn- und Treibstoffen für Verbrennungssysteme. Die Investitionen in neue und zu erneuernde Förderanlagen für Erdgas und Erdöl werden wiederum rentabel. Zudem können bisher wirtschaftlich nicht gewinnbare Ressourcen erschlossen werden. Zu den gemäss Bericht der Internationalen Energieagentur bisher verbrauchten Erdölvorkommen kommt die rund 4-fache Menge hinzu, die nun kostendeckend gewonnen werden kann. Die Gewinnung anderer fossile Energieträger wie Kohle wird konkurrenzfähig. Energieträger auf der Basis von Biomasse, die durch Verbrennung in Nutzenergie umwandelbar sind, können wettbewerbsfähig werden. Die hohen Energiepreise stellen zudem neue Anforderungen an die Effizienz der Energieumwandlungssysteme und erlauben dafür einen höheren Aufwand zu treiben.

Auf der anderen Seite beeinflussen die Verbrennungsforschung aktuelle umweltrelevante Themen wie Klimawechsel durch CO₂ Emissionen und Gesundheitsbeeinträchtigung durch Feinstaubemissionen. Hinzu kommt ein weltweit stark zunehmender Energieverbrauch und damit Ressourcenverzehr dem von verschiedener Seite Einhalt geboten werden soll.

Das Thema der Verbrennungsforschung wird im Vergleich zu den Vorjahren vor neue Herausforderungen gestellt. Die bisher ökonomisch weniger relevante Effizienzverbesserung wird aus wirtschaftlichen Gründen zwingend. Hinzu kommt die Forderung an die Reduktion des CO₂-Ausstosses und die Vermeidung weiterer umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe. Die international vielerorts geförderten Projekte für die Elimination des CO₂ aus der Nutzung fossiler Energieträger führen zu neuen Herausforderungen für die Verbrennungssysteme und bringen andere Brennstoffe hervor. Neben fossilen Energieträgern werden künftig synthetische Brennstoffe, Biomasse und Wasserstoff an Bedeutung gewinnen. Verbrennungssysteme müssen für die effiziente und schadstoffarme Nutzung von biogenen Brennstoffen nicht nur angepasst sondern auch optimiert werden.

Die Nutzung fossiler Energieträger durch Verbrennung hat unsere Energieversorgung in der Vergangenheit dominiert und wird auch in Zukunft weltweit massgebend bleiben. Eine weitere Verbesserung der bereits auf hohem Niveau stehenden Verbrennungssysteme ist somit gefordert.

Die Schweizer Verbrennungsforschung ist international anerkannt. Der Bund setzt dafür jährlich 11 Mio Fr. ein. Hinzu kommen die Forschungsgelder der in der Schweiz aktiven Motorenhersteller, Zulieferer der Verbrennungsindustrie und Entwicklungszenter mit rund 5'000 Mitarbeitern und einem Umsatz von ca. 2 Mia. Fr. Durch die vorgenannten geänderten Rahmenbedingungen entstehen auch neue Chancen für die Schweizer Industrie und Forschungsinstitutionen. Um im weltweiten Forschungsumfeld einen Beitrag leisten zu können, sind eine Konzentration und die Kontinuität in ausgewählten Themen erforderlich. In der Umsetzung des Forschungsprogramms Verbrennung wird diesem Umstand Rechnung getragen.

Die Ausrichtung des Programms Verbrennung richtet sich nach den Vorgaben des **Konzeptes der Energieforschung des Bundes** [14], das für die Periode 2008- 11 neue festgelegt wurde. Die technischen und ökonomischen Ziele sind:

- Reduktion des spezifischen CO₂ Ausstosses
- Erhöhung des (System-)Wirkungsgrades zur Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs (Ressourcenschonung, Ökonomie)
- Fähigkeit, verschiedene Energieträger und vor allem auch biogene zu nutzen
- Reduktion der Schadstoffemissionen (u.a. Feinstaub) zur Erfüllung der kontinuierlich schärferen Vorschriften
- Verbessern der Konkurrenzfähigkeit von Verbrennungssystemen für biogene Energieträger.

Daraus leiten sich folgende Schwerpunkte ab:

- Darstellung von «Null-Emissions-Systemen» für die kleinskalige (10kW bis 100 kW) kombinierte Strom-Wärme-Kälte-Erzeugung (inkl. Wärmepumpe und Biomasse).
- Integration der Erkenntnisse aus experimentellen Grundlagenprojekten (Laserdiagnostik) in die Entwicklung miniaturisierter, nicht-invasiver Sensoren für den realen Einsatz in Verbrennungsmaschinen.
- Optimierung der Gemischaufbereitung und Verbrennung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim (Teil-)Einsatz von biogenen Kraftstoffen.
- Umsetzung von Grundlagenkenntnissen für die Darstellung von Technologien zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften (EURO 6, USA 2010/14) mit Schwerpunkt mittlerer und grösserer Dieselmotoren
- Entwicklung robuster Modelle (Schwerpunkt CRFD) für den Einsatz in der Entwicklung, Optimierung und Diagnose von neuen Verbrennungssystemen, von verbesserungsbedürftigen Grundlagen bis hin zu Anwendungen.

- Stärkere Vernetzung der experimentellen und numerischen Methoden für die Optimierung des Gesamtsystems Motor-Abgas-Nachbehandlung.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

NUMERISCHE SIMULATION, MESSMETHODEN UND VERSUCHSTRÄGER

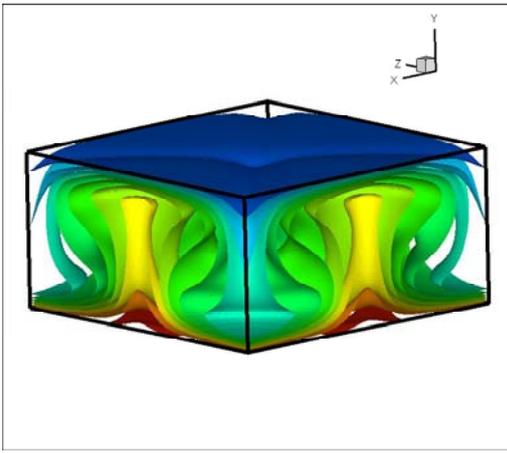
Um Fortschritte in der Verbrennungsforschung zu erzielen und die sich technisch konkurrenzierenden Aufgaben Wirkungsgraderhöhung und Schadstoffreduktion zu beherrschen, ist ein laufend verbessertes Verständnis für die Vorgänge und Einflussfaktoren der Verbrennung als chemischer, thermodynamischer aber auch kinetischer Prozess erforderlich. Rein empirisches Vorgehen bringt nur zufällige Ergebnisse. Wichtige Instrumente sind computergestützte Berechnungsmodelle (Modellierung), optische Messverfahren (Laserspektroskopie) sowie geeignete Versuchsträger, um die theoretischen Ergebnisse zu überprüfen oder die erforderlichen Kennzahlen zu liefern.

Im Projekt **Lattice Boltzmann Simulationenmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** [1] wurde am Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) der ETH Zürich eine neue Annäherung für die rechenunterstützte Strömungsdynamik an einer Mikrometerskala entwickelt. Diese Annäherung basiert auf den sogenannten Boltzmann Gitter-Modellen (Lattice Boltzmann Method) der Boltzmann-kinetischen Gleichung. Als Ergebnisse des Projektes, sind folgende Ziele erreicht worden:

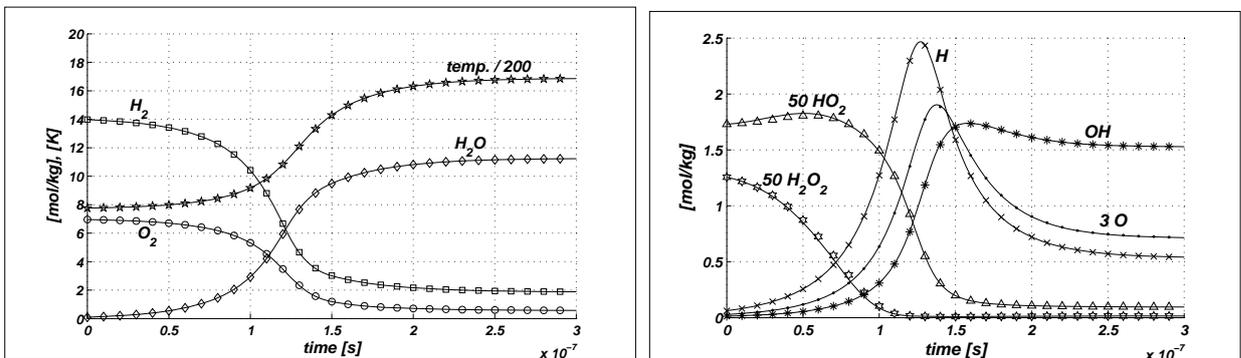
1. Die komplette Klasse von neuen und numerisch stabilen Lattice Boltzmann Modellen mit mehreren Geschwindigkeiten der Teilchen ist hergeleitet und mathematisch bewiesen.
2. Rechnerisch effiziente drei-dimensionale Modelle für isotherme Strömungen wurden entwickelt und dazugehörige effiziente parallele Computerprogramme an mehreren Problemen getestet. Diese Modelle zeigten numerische Stabilität und sind deshalb sehr wichtig für die Simulation bei höheren Reynolds-Zahlen, wie sie in turbulenten Strömungen vorherrschen. Durch die speziellen Modifikationen (zum Beispiel Outflow Randbedingungen) ist es gelungen, effiziente Simulationen in Angriff zu nehmen.
3. Ein drei-dimensionales thermisches Modell wurde weiter entwickelt und realisiert in einigen „benchmark“ Strömungen (zum Beispiel die Rayleigh-Benard Strömung). Es ist auch gelungen die Strömungen mit erheblichen Temperatur- und Dichteschwankungen mit diesem Modell zu beschreiben. (Fig. 1)
4. Das Modell für Strömungen mit mehreren Komponenten wurde entwickelt, implementiert und getestet.
5. Die neuen Modelle wurden auch zur Beschreibung von Strömungen von verdünnten Gasen angewendet.
6. Eine Methode zur Reduktion komplexer Reaktionsmechanismen wurde entwickelt und getestet für zukünftige Verbrennungsanwendungen. (Fig. 2)

Theoretische Fragen sind dabei vollständig geklärt, wie die längst nötigen stabilen Lattice Boltzmann Modelle auf grössere Gittern und die praktischen Fragen der effektiven Anwendung. Das mikroskopisch abgeleitete thermische Modell verbessert im Wesentlichen die früheren Ergebnisse der isothermalen Modelle, was unter anderem mit einer neuen Klasse der exakten Lösungen bewiesen wurde. Diese 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 insgesamt 30 Publikationen und Pre-prints dargestellt.

Durch diese Ergebnisse eröffnen sich neue 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. Die damit entstandenen neuen Simulationmöglichkeiten sind bereits weiter ausgebaut im Rahmen des CCEM-CH Projektes „CEMTEC“.



Figur 1: Konturen eines Temperaturfeldes bei $Ra = 5000$ in einer Rayleigh-Bernhard Strömung. Berechnet mit der dreidimensionalen Lattice Boltzmann methode.



Figur 2. Vergleich von reduziertem Modell (Symbole) und detailliertem Modell (Linien) zeigt beste Übereinstimmung

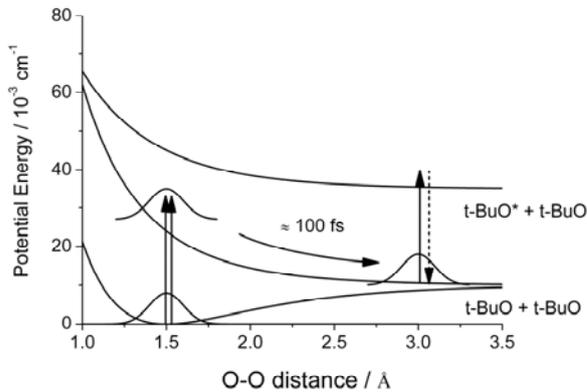
Peroxy Radikale bestimmen das Zündverhalten im Verbrennungsprozess und beeinflussen die Speziation der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung weiterer Reaktionen. Trotz intensiven Studien ist die quantitative Beschreibung der Prozesse im Zündvorgang noch nicht gesichert. Vielmehr beruht die Beschreibung auf zwar recht glaubwürdigen aber letztlich unbewiesenen Modellen. Diese Situation kann nur geändert werden, indem die Peroxy Radikale auf molekularer Ebene genau beschrieben werden können.

Für die Darstellung von Peroxy Radikalen wurde im nun abgeschlossenen Projekt **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** [2] der PSI (Paul Scherre Institut) Gruppe "Molekulare Dynamik" eine neue Molekularstrahl Apparatur konstruiert und in Betrieb genommen. Eine neuartige Radikalen-Quelle wurde installiert. Mit Hilfe einer elektrischen Gasentladung können unter günstigen Umständen spezielle Radikale gezielt dargestellt werden. Nach der Entladung kann dem aus der Entladungskammer strömenden Gas ein weiteres Gasgemisch beigefügt werden. Damit ist es möglich, kurz vorher erzeugte Radikale mit neutralen Molekülen reagieren zu lassen. Die neue Versuchseinrichtung erlaubt, lineare und nichtlineare spektroskopische Messungen gleichzeitig an Molekülen in einem Molekularstrahl durchzuführen.

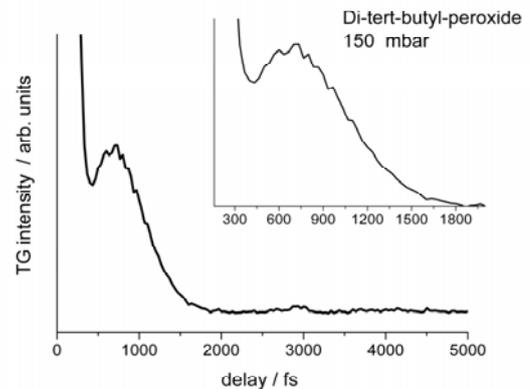
Die im Projekt zur Reife gebrachte Photo-Fragmentation-Excitation (PHOFEX) sowie die fs-Vierwellen-Methode (fs-CARS) wurden auf H_2CO und HCO angewendet. Diese Messmethoden wurden im Hinblick auf kommende Peroxyl Untersuchungen weiterentwickelt und modifiziert. Die auf H_2CO bezogenen Arbeiten, die ihrerseits für die Beschreibung von Zündprozessen relevant sind, wurden im Rahmen von zwei Doktorandenarbeiten vom SNF (Schweizer National Fonds) unterstützt.

Massenspektrometrische Versuche wurden durchgeführt, um ionisierte Alkyl-Peroxy Radikale nachzuweisen. Der Nachweis konnte bisher nicht erbracht werden. Es wird vermutet, das Peroxy-Ionen, keinen stabilen Ionenzustand aufweisen. Der Beweis für diese Vermutung oder deren Gegenteil konnte noch nicht schlüssig erbracht werden. Versuche mit erweiterten spektroskopischen Methoden, die in einem Nachfolgeprojekt an der Chemical Dynamics Beamline am SLS-Synchrotron durchführen

werden, sollen Klarheit schaffen. Femtosekunden-Spektroskopien wurden auf di-Terbutyl Peroxy angewandt. Die erhaltenen Signale können auf Anhieb noch nicht schlüssig interpretiert werden. Es wird mit einem grösseren Aufwand gerechnet, um die involvierten Dissoziationsprozesse zustandsspezifisch angehen zu können.



Figur 3: Potentielle Energieflächen und mögliches Zerfallsschema von Di-tert-Butyl Peroxy



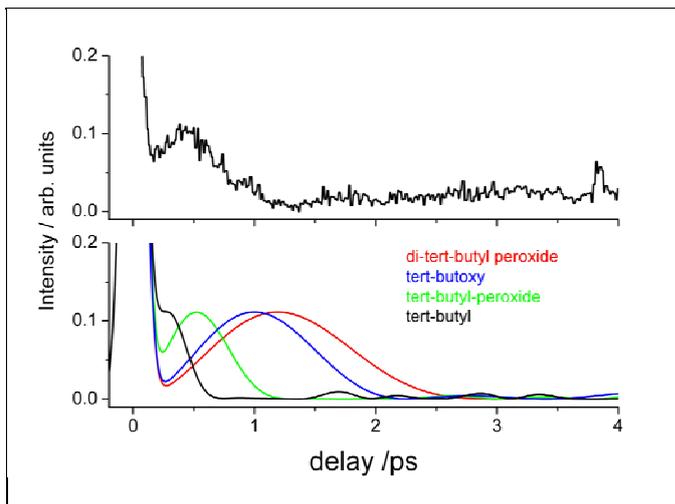
Figur 4: UV-Resonanz fs-transientes Signal von Di-tert-Butyl Peroxy gemäss Zerfallsschema in Fig. 4

Unter dem abgekürzten Titel **“Peroxy”** [2] wurde im 2007 am PSI ein nachfolgendes Projekt gestartet. Dieses hat das Ziel, mit der Chemical Dynamics Beamline am Swiss Light Source (SLS)-Synchrotron am PSI [16] eine gute spektroskopische Basis zur Erfassung der Alkyl-Peroxy Radikale zu erstellen. Peroxy Radikale bestimmen wie erwähnt das Zündverhalten brennbarer Kohlenwasserstoffen/Luft Gasmische. Im Rahmen der Untersuchungen müssen unter Umständen auch die Edukte und Produkte der Peroxy Radikale vermessen werden. Dazu gehören Alkyl Radikale, Olefine, Aldehyde und Hydroperoxide.

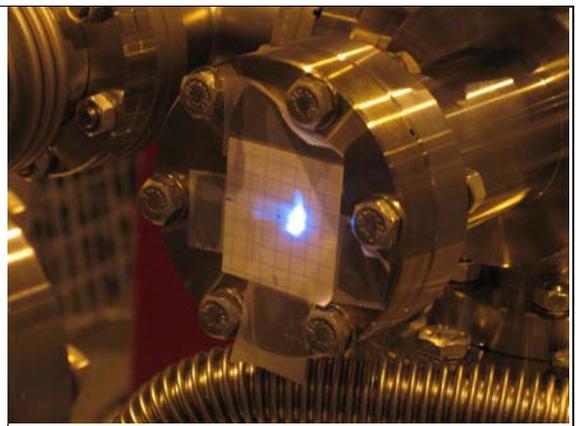
Bis heute gibt es keine vollständigen spektroskopischen Datensätze von Peroxy-Radikalen. Um diese Lücke zu schliessen, wurden aufwändige spektroskopische Messmethoden und spezielle Molekularstrahlapparaturen entwickelt, in denen die zu untersuchenden Radikale in einer gut definierten sauberen Umgebung dargestellt werden können. Im nahezu stossfreien Molekularstrahl bleiben die bei tiefen Temperaturen gebildeten Radikale stabil, bis sie gezielt mit Licht angeregt und zur Dissoziation gebracht werden können. Für diese Dissoziationsprozesse in Abhängigkeit der Anregungsenergie besteht ein besonderes Interesse, da durch sie die Bindungsenergien und damit Aktivierungsenergien und Bindungsenthalpien bestimmt werden können.

Mit Hilfe einer neuen Versuchsanlage konnten FWM (Four wave mixing) und CRD (cavity ringdown) Signale von Radikalen mit einem Signal/Rausch Verhältnis (S/N) von im Allgemeinen besser 100 erzielt werden. Mit einer besonders sorgfältigen Justierung gelang der Nachweis von C_2^- Molekülen sogar mit einem S/N Abstand von 10^8 . Auf Grund dieser hervorragenden Empfindlichkeit konnten anschliessend auch C_2^- Anionen mit einem gut interpretierbaren Spektrum direkt nachgewiesen werden, - nach unserer Kenntnis das erste Mal überhaupt. Diese demonstrierte Empfindlichkeit ist ein wesentlicher Schritt in Richtung Vermessung von Peroxy Radikalen.

Die Anwendbarkeit von dreifach resonanten fs – FWM Methoden konnte anhand von H_2CO demonstriert werden. Die Anwendung derselben Messmethode auf Di-tert-butyl Peroxy ergibt Hinweise, dass offenbar Butyl-Peroxy Radikale gebildet werden (Fig. 5). Dieses Resultat ist ein erster Einstieg in die Spektroskopie der Peroxy-Radikale



Figur 5: Vergleich von Peroxy-Messungen mit Modellberechnungen weisen darauf hin, dass Butyl-Peroxy Radikale gebildet werden (grüne Linie entspricht am besten der Messung (schwarzer Linie))

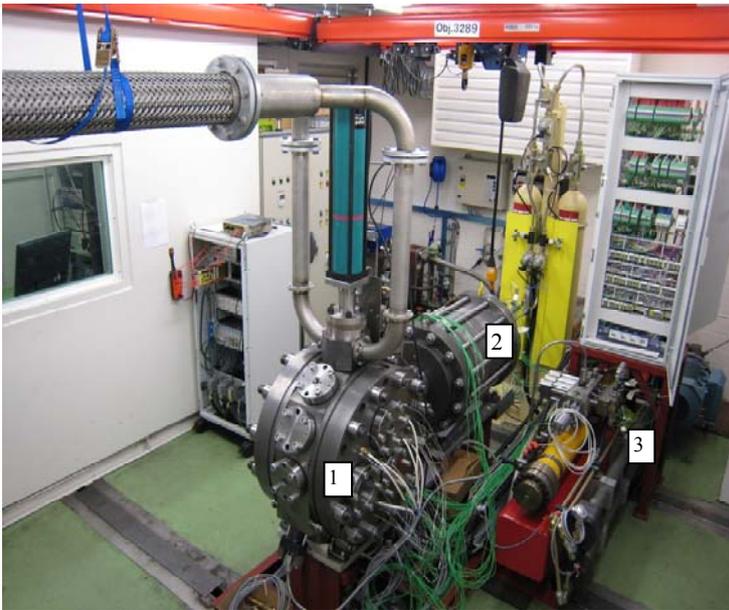


Figur 6: Justierung der Lichtquelle auf die Versuchsanordnung ist noch erforderlich

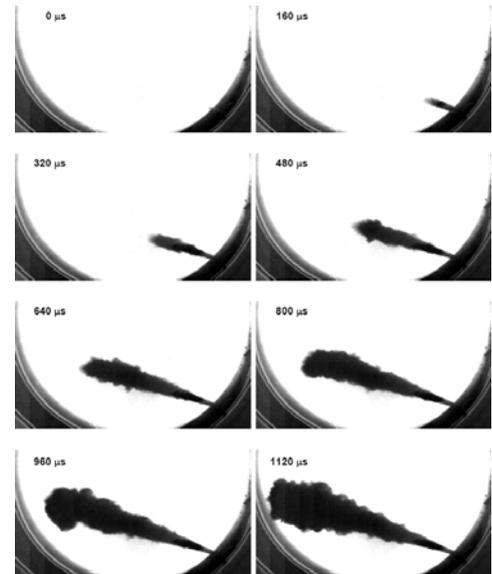
Im EU-Projekt **HERCULES** (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships) [3] werden neue Technologien in Bezug auf grosse Schiffsdieselmotoren entwickelt. Schweizer Partner sind *Wärtsilä/CH*, *ABB Turbosystems*, das LAV der ETHZ, das PSI und die EMPA. Ein Teilprojekt befasst sich mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für dessen Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Im vom BFE unterstützten und 2007 abgeschlossenen Projektteil wurde ein experimenteller Versuchsträger entwickelt, der das Verbrennungssystem grosser 2-Takt-Schiffsdieselmotoren unter Berücksichtigung der charakteristischen Bedingungen weitestgehend repräsentieren soll, um die benötigten Referenzdaten zu generieren.

Die Fertigstellung und die Inbetriebnahme des neuen komplexen Versuchszustandes wurde im Berichtsjahr weitgehend erreicht. Zunächst wurde der Prüfstand durch die letzten noch fehlenden Elemente wie das Abgassystem oder die Stickstoff-Zufuhr vervollständigt. Zudem konnte das für die Prozessgasvorwärmung eingesetzte komplexe Aggregat durch neu entwickelte Druckverschraubungen im Hinblick auf den Netzanschluss erfolgreich modifiziert werden. Ferner konnte das hinsichtlich schiffsdieselmotorischer Verbrennung realistische Einspritzsystem vervollständigt, dessen Steuerung komplettiert, getestet und schliesslich in Betrieb genommen werden. Im Hinblick auf die Inbetriebnahme der Anlage bestand ein wesentlicher Aspekt auch in der Weiterentwicklung der relativ komplexen Steuerung, u.a. auch mit eigens entwickelten elektronischen Komponenten. Nach der Überprüfung aller Verbindungen und Signale zwischen den Schaltschränken und den individuellen Feldgeräten konnten auch die für den Betrieb und die Datenerfassung zur Steuerung eines Messprozesses erforderlichen spezifischen Komponenten erfolgreich getestet und in Betrieb genommen werden. Schliesslich konnten dadurch erste Experimente zur Visualisierung der Einspritzung durchgeführt werden.

Aufgrund der ersten messtechnischen Versuche bzw. der Inbetriebnahme dieses neuartigen Prüfstandes ist nun mit dem Projektabschluss ein primäres Entwicklungsziel erreicht worden. Eine Bestätigung der bisherigen Anstrengungen bzw. des grossen Interesses an diesem Projekt zeigt sicher auch die im Rahmen des internationalen CIMAC-Kongresses erhaltene Auszeichnung "2007 BP Award on Health, Safety & Environment". In einem nächsten Schritt sollen Versuche durchgeführt werden. Ein entsprechendes Nachfolgeprojekt (*HERCULES β*) wurde innerhalb des 7. EU Rahmenprogramms (FP7) beantragt. Mit dem realisierten Versuchszustand steht den Schweizer Forschungspartnern aus Industrie und Hochschule ein langfristig einsetzbares F&E-Instrument zur Erhöhung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit auf diesem Gebiet zur Verfügung.



Figur 7: Versuchstand mit Versuchszylinder (1), Prozessgasvorwärmer (2), Einspritzsystem (3)



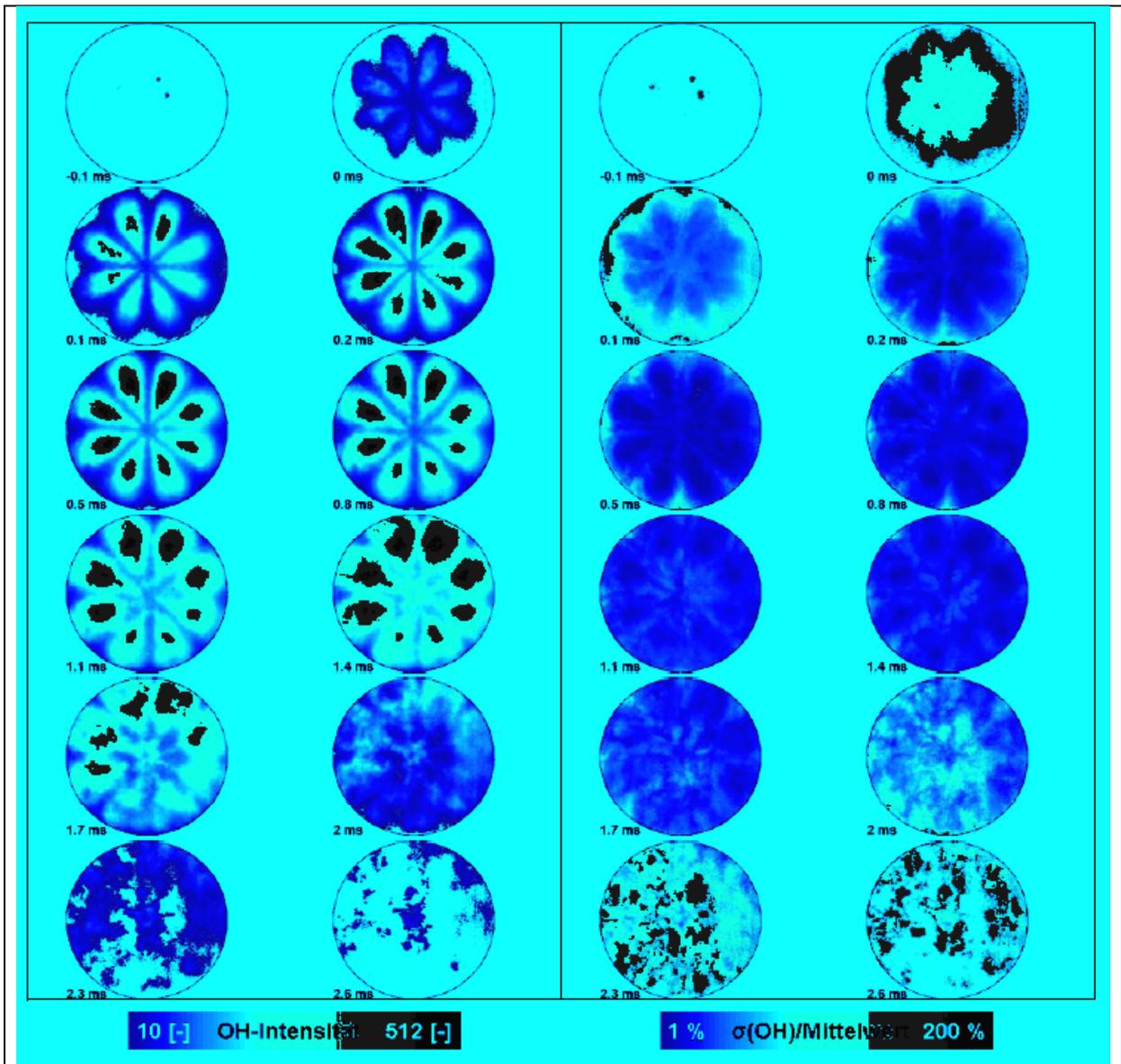
Figur 8: Schattenbilder Einspritzung in Versuchszylinder

ERHÖHUNG UMWANDLUNGSEFFIZIENZ UND SCHADSTOFFREDUKTION

Die Bildung von Schadstoffen und Russpartikel hängt bei der Dieselverbrennung von Unzulänglichkeiten respektive Inhomogenitäten im Verbrennungsprozess ab. Die Bestrebungen gehen in die Richtung einer möglichst homogenen, kompressionsgezündeten Dieselverbrennung (HCCI-System: Homogeneous Charge Compression Ignition). Die Umsetzung dieser Anforderung über das ganze Kennfeld oder des Motorbetriebs d.h. im Teillast-, Vollast- und Lastwechselbereich, stellt jedoch hohe Ansprüche an die Forschung und Entwicklung. Hinzu kommen die Auswirkungen der jeweiligen Anwendung des Motors, des instationären Betriebs und der gegenseitige Beeinflussung in Mehrzylindermotoren mit unterschiedlichen Daten von Zylinder zu Zylinder. Neben der Verbesserung der Einspritzsysteme, Brennraumgeometrie, Veränderung des Luftüberschusses, der Drücke und der Temperaturverhältnisse sowie der Abgasrückführung ist auch die Zusammensetzung des Brennstoffes zu prüfen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf realisierbaren Mehrkomponentenkraftstoffen – und zwar entweder auf herkömmlichen oder solchen, die im Sinne eines *designer-fuel* entsprechend konfiguriert werden können.

Im Projekt **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** [4] wurden am LAV der ETHZ in einer optisch zugänglichen Simulationsapparatur experimentelle Grundlagen für verschiedene Brennstoffe in der homogenen, kompressionsgezündeten Verbrennung (HCCI) erarbeitet. Die Untersuchungen im Einhubtriebwerk wurden mit n-Heptan (dieselähnliches Zündverhalten) und n-Butan (benzinähnliches Zündverhalten) sowie Kombinationen von n-Butan und Diesel durchgeführt. Das Einhubtriebwerk ist in der Lage, einen mit einem konventionellen Motor vergleichbaren thermodynamischen Zustand rund um den OTP (oberer Totpunkt) zu schaffen. Durch die Flexibilität des Prüfstandes und durch die verwendeten Kraftstoffe ist es möglich, einen grossen Bereich der motorischen Verbrennung abzudecken. N-Butan, gasförmig bei atmosphärischen Bedingungen, ermöglicht eine gute Homogenisierung vor Kompressionsbeginn. Wie bei den Versuchen mit n-Heptan waren die charakteristischen Zustände im Brennraum bei Umsatzbeginn bei einer Variation des Verbrennungsluft- und Kompressionsverhältnisses sowie der Abgasrückführungs-(AGR)-Rate von Interesse. Es zeigte sich, dass die LTR (Tieftemperaturreaktion) und HTR (Hochtemperaturreaktion) in einem engen Temperaturbereich auftreten. Im Vergleich zur n-Heptan OH-Chemilumineszenz weisen die Versuche mit n-Butan eine geringere Streuung auf und die Verbrennung findet im gesamten Brennraum statt. Der Vergleich der n-Butan Ergebnisse mit numerischen Ergebnissen aus dem homogenen Reaktor mit mehreren Zonen und einem am LAV der ETHZ entwickelten n-Butan Reaktionsmechanismus zeigte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Die so validierte Mehrzonen Simulation konnte benutzt werden, um die hohe Sensitivität der Temperatur auf die Zündeinleitung zu zeigen. Durch eine thermische Inhomogenität im Zylinderkopf gelang es, bei genügend hoher Temperatur des Thermoanpassers das n-Butan Gemisch stabil zu entzünden. Die detektierte OH-Chemilumineszenz zeigt einen Umsatzbeginn in der Nähe der beheizten Oberfläche.

Die zweite Inhomogenität betrifft die Einspritzung von Dieselkraftstoff in eine homogen vorliegende n-Butan Grundladung. Durch die Variation des Einspritzzeitpunktes des Dieselkraftstoffs sowie der Diesel- und n-Butan Masse gelang es, den Umsatzbeginn und die Wärmefreisetzungsrate der n-Butan Verbrennung zu beeinflussen (Fig. 9). Um das Zündverhalten der HCCI-Verbrennung besser charakterisieren und verstehen zu können, sollten in Nachfolgeprojekten einerseits ein Satz von Mehrkomponenten-Kraftstoffkennzahlen gefunden und andererseits die Untersuchung der Gemischaufbereitung, Zündung und Verbrennung von synthetischen Dieselkraftstoffen mit gezielt veränderter Zusammensetzung (chemische und physikalische Eigenschaften) vorangetrieben werden. Das Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* hat eine enge Verknüpfung mit dem im November 2007 gestarteten Projekt *Kraftstoffkennzahlen der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV)* [15] in Zusammenarbeit mit drei anderen Hochschulen und mehreren Industriefirmen.



Figur 9 Gemittelte (links) sowie mit dem Mittelwert gewichtete Standardabweichung der OH-Chemilumineszenz (rechts), 11 Messungen, $\lambda_B = 4.0$, $\epsilon = 17$, $m_D = 5$ mg, $ESB = 0.8$ ms vOTP, $T_{Wand} = 293$ K

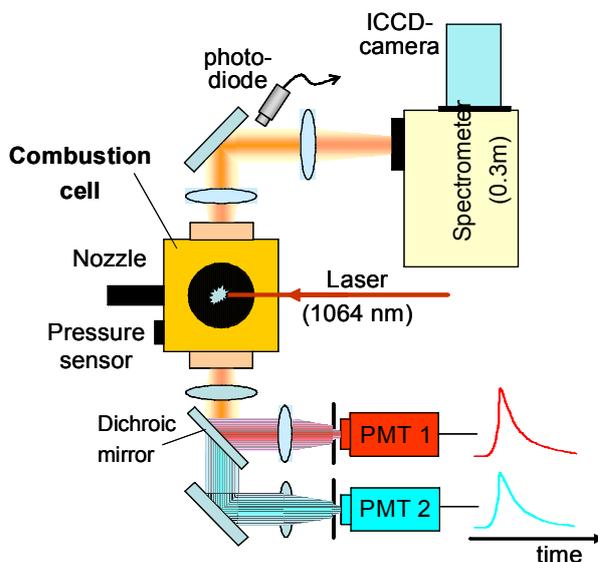
Fig. 9 zeigt die Analyse der zyklischen Streuung der OH-Chemilumineszenz der kombinierten Einspritzung von n-Butan und Dieselkraftstoff bei einem Einspritzbeginn von 0.8 ms vor OTP. Es zeigt sich, dass im Vergleich zur frühen n-Heptan Einspritzung und zur reinen n-Butan Verbrennung die zyklische Schwankung abnimmt und zwar nicht nur in Zonen mit hoher OH-Intensität sondern auch in Bereichen in Zylinderwandnähe. Diese Analyse lässt den Schluss zu, dass es somit möglich ist, eine homogene n-Butan Grundladung mit einer Dieseleinspritzung reproduzierbar mit geringen zyklischen Schwankungen zu zünden.

Für ein besseres Verständnis der Russbildung und Russoxidation als Funktion verschiedener Betriebsparameter wie Einspritzdruck, Brennraumtemperatur und –druck d.h. der Verbrennungsbedingungen muss die innermotorische Entwicklung der Russpartikelgröße bei der Dieselverbrennung möglichst on-line und in-situ im Verbrennungsraum beobachtet und erfasst werden können.

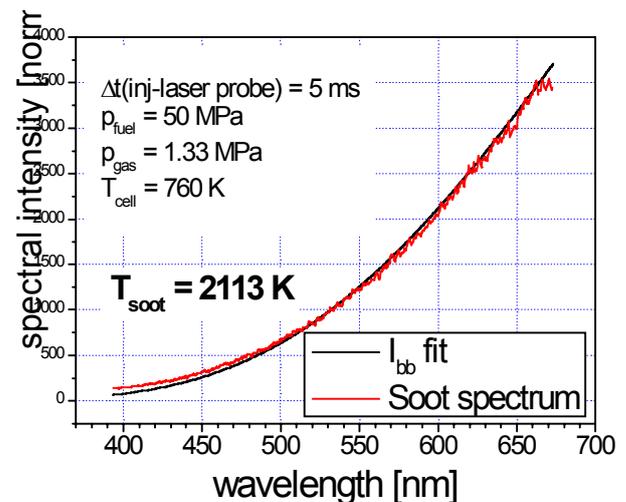
Zur Bestimmung der mittleren Partikelgrößen von Russ während der Diesel-Verbrennung wurden im Projekt **Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures** [5] die Methode der zeitaufgelösten **Laser-Induzierten Inkandescenz (LII)** an der am PSI betriebenen Hochdruck-Einspritzkammer eingesetzt (Fig. 9). Ein 2-Farben LII Experiment zur simultanen Registrierung räumlich aufgelöster Russemissions-Spektren wurde realisiert. Transiente LII-Signale konnten zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einspritzbeginn bei Gegendrücken zwischen 1 und 3.5 MPa und bei Einspritzdrücken von 50-130 MPa aufgezeichnet werden (Fig. 10).

Das Abkühlverhalten der laser-aufgeheizten Partikel wurde durch Lösung der Transportgleichungen für Masse und Energie berechnet und die ermittelte LII-Signalintensität mit einem thermophysikalischen Modell an experimentelle LII-Abklingkurven angepasst. Die Auswertung ergab mittlere Partikeldurchmesser der Russteilchen zwischen 10-20 nm, je nach Gasdruck, Einspritzdruck sowie dem Zeitpunkt nach Einspritzbeginn, (5-16 ms). Insbesondere zeigte sich, dass bei einer 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. Um den Einspritzvorgang 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 erlauben wird.

Resultate mit dieser kombinierten Messanordnung liegen jedoch noch nicht vor. Durch personelle Veränderungen mussten die Arbeiten teilweise ins Folgejahr verschoben werden.



Figur 9: Experimentelle Anordnung für die simultane Registrierung von transienten LII-Signalen und Russ-Emissionsspektren an der Hochdruck-Einspritzkammer.



Figur 10: Russ-Emissionsspektrum, aufgenommen in der Spray-Verbrennungskammer bei den angezeigten Betriebsbedingungen. An die experimentellen Daten wurde die Planck-Funktion (I_{bb}) eines grauen Strahlers angepasst

Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit durch Informationsaustausch zu verbessern, war auch ein Ziel der am 5.11.07 am PSI durchgeführten Tagung **Verbrennungsforschung in der Schweiz** []. Den interessierten akademischen und industriellen Forschungs- und Entwicklungsgruppen wurde dabei Gelegenheit gegeben, sich über neue Möglichkeiten der Zusammenarbeit und Forschungsförderung sowie

über aktuelle Projekte zu informieren. Zudem sollte damit die in der Vergangenheit im jährlichen Rhythmus durchgeführte Veranstaltungsreihe der Schweizerischen Vereinigung für Verbrennungsforschung (SVV) [7] und der Interessengruppe «Combustion and Pollutant Formation (Measurement & Modeling Techniques)» des Leonhard Euler Centers (LEC) der European Research Community On Flow, Turbulence And Combustion (ERCOFTAC) [8] wieder aufgegriffen werden. Das Vortragsprogramm umfasste sowohl grundlagenorientierte Beiträge über neuere Ergebnisse der beteiligten Forschungsinstitute, als auch anwendungsorientierte Beiträge aus dem industriellen Umfeld in der Schweiz. Darüber hinaus wurden die Ziele und Rahmenbedingungen der Förderung der Verbrennungsforschung des BFE und der KTI vorgestellt. Die notwendigen Forschungsanstrengungen aus der Sicht der Industrie wurden durch die Schweizer Vertretung von Wärtsilä und Alstom präsentiert. Die Tagung bot zudem eine rege genutzte Plattform zum Informationsaustausch in der Gemeinschaft der Verbrennungsforschung in der Schweiz.

Noch verbesserungsfähig ist die Übersicht über die vielfältigen Aktivitäten der Fachhochschulen und deren Zusammenarbeit mit der Industrie. Die Hochschulkompetenzgruppe für Verbrennungsmotoren (HKV) [9] versucht das Netzwerk in diesem Bereich zu stärken. Sie trifft sich jährlich zu einem Informationsaustausch über die Aktivitäten der verschiedenen Fachhochschulen. Auch Forschende aus dem ETH-Bereich sowie einzelne Akteure der Industrie sind dabei vertreten.

Im Projekt **Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** [1] erfolgte eine Zusammenarbeit zwischen dem LAV der ETHZ und der Gruppe für Grundlagen der Verbrennung des PSI. Dies ein Beispiel für die gute Zusammenarbeit zwischen den Forschungsinstituten des ETH-Bereichs. Mit den Stärken aus dem gezielten Einsatz der unterschiedlichen Kompetenzen können die Chancen des internationalen Forschungswettbewerbs besser genutzt werden. Über das ETH-Kompetenz Zentrum Energie und Mobilität (CEEM) erfolgt heute auch über die Zuteilung der Mittel eine Koordination und Bündelung.

Die aus der Sicht der Wirtschaft wichtige Zusammenarbeit der öffentlich-rechtlichen Forschungsinstitutionen mit der Industrie erfolgt in diversen Projekten der Verbrennungsforschung in der Schweiz. Dazu gehört das vom BFE unterstützte Projekt **HERCULES** [3]. In der Schweiz sind die ETHZ und das PSI sowie *Wärtsilä Schweiz* (ehemals *New Sulzer Diesel*) Partner in diesem internationalen Projekt.

Internationale Zusammenarbeit

Neben der nationalen Zusammenarbeit erfolgt im von der EU mitfinanzierten Projekt **HERKULES** [3] ein intensiver Austausch mit Hochschulen und der Industrie auf internationaler Ebene. Das Projekt wird als Gemeinschaftsprojekt im 6. EU-Forschungsprogramm [10]. gefördert. Das Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme der ETHZ leitet im Arbeitspaket *Advanced Combustion Concepts* im Projekt *Combustion Process Simulation* das Teilprojekt *Test Facilities*. Neben der bereits erwähnten Zusammenarbeit mit *Wärtsilä* sind 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 Finland (WFI)* beteiligt.

Das Projekt **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** [4] war Teil einer internationalen Ausschreibung der deutschen *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV)* [15]. Das LAV der ETHZ erhielt den Zuschlag, was seine Kompetenz und die internationale Konkurrenzfähigkeit bestätigt. Eine Zusammenarbeit erfolgt mit der Universitäten in Stuttgart und Braunschweig sowie der Fachhochschule Dresden.

Die u.a. vom BFE und BAFU aber auch von zahlreichen nationalen und internationalen Firmen unterstützte 11. ETH-Konferenz **über Combustion generated Nanoparticles** [11] fand auch im 2007 wiederum grosses Interesse. Referate und Posters beschäftigten sich mit der ganzen Breite des Themas von der Entstehung des Feinstaubes in der Verbrennung, über die Möglichkeiten zur Elimination durch Filter bis hin zu den gesundheitlichen und umweltrelevanten Auswirkungen. Hinzu kamen Präsentationen über Messmethoden sowie die gesetzlichen Massnahmen, deren Zweckmässigkeit und Erfolge.

Im **Implementing Agreements for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion** der Internationalen Energie Agentur IEA [12] ist das BFE Mitglied des **Executive Committee** und Forschungsinstitute des PSI und der ETH in verschiedenen Projekten vertreten. Die im 2006 gestartete Neuorientierung in der Struktur und den Inhalten der Projekte wurde im 2007 fortgeführt. Bisher von einzelnen Mitgliedern bearbeiteten Aufgaben werden schrittweise abgeschlossen und durch neue in länderübergreifenden Arbeitsgruppen bearbeitete Collaborative Tasks abgelöst. Das PSI und die ETH sind in den Projekten *Internal Combustion Sprays, Gas Turbines und Homogeneous Charge Com-*

bustion Engin engagiert. Jährlich findet ein Meeting statt in dem die Vertreter aus 12 verschiedenen Ländern ihre Arbeiten präsentieren. Dies bietet auch den Forschenden aus der Schweiz die Möglichkeit mit den Kollegen Erfahrungen auszutauschen. Eine starke Vertretung in dieser IEA-Arbeitsgruppe ist nach wie vor aus den USA und Japan zu verzeichnen.

Die fossilen Energieträger werden auch in den kommenden Jahren die Schweizer Energieversorgung und damit die Verbrennungsforschung dominieren. Eine Vertretung des BFE arbeitet deshalb in der **Working Party for Fossil Fuels WPF der IEA** [13] mit. Diese leitet unter anderem die *Implementing Agreements Greenhouse Gas R&D Programme, Enhanced Oil Recovery* und das *IEA Clean Coal Centre* und richtet ihre Berichte und Empfehlungen an das IEA Governing Board. Im Berichtsjahr wurden die Aktivitäten der WPF ausgedehnt in dem mit den G8+5-Staaten Süd Afrika, Indien, China, Mexiko und Brasilien ein Informationsaustausch gestartet wurde. Diese Staaten sind heute massgeblich am Zuwachs des Verbrauchs an fossilen Energieträgern und entsprechend der CO₂-Emissionen sowie dem Neubau von Energieumwandlungsanlagen mit beteiligt. Aus den Berichten der IEA ist erkennbar, dass aufgrund der hohen Energiepreise erhebliche zusätzliche Vorkommen an fossilen Energieträgern nun kostendeckend gewonnen werden können. Die Reduktion der CO₂-Emissionen hat grosse Priorität und soll durch Wirkungsgradverbesserung und Eliminationsverfahren (Carbon Capture and Storage CCS) an den Förderstellen und bei grossen Kraftwerken angegangen werden. Erste Kohlekraftwerke mit CCS sollen grossmasstäblich in den kommenden fünf Jahren realisiert werden. An das Governing Board der IEA wurden zudem Empfehlungen für die Vorbereitung von neuen Kraftwerkseinheiten für die CO₂ Elimination (Capture Ready) abgegeben. Kontrovers werden die Vorschriften für die Vorbereitung der CO₂-Endlagerung diskutiert. Breite Erfahrungen bestehen noch nicht, weshalb die Sicherheitsbedenken der Öffentlichkeit bisher nicht mit Fakten ausgeräumt werden konnten.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Rückblick

Verschiedene Projekte konnten im 2007 abgeschlossen werden. Besonders erfolgreich war das Projekt **Lattice Boltzmann Simulationenmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** [1] in dem die gesteckten Ziele vollumfänglich erreicht wurden. Das Projekt erreichte auch international grosse Anerkennung, was mit zahlreichen Publikationen bestätigt wurde. Ein Ziel des Forschungsprogramms Verbrennung, die mathematischen Modelle zu verbessern, wurde damit erfüllt. Die Inbetriebnahme des in den vergangenen drei Jahren vollständig neu geplanten und aufgebauten Prüfstand für das EU-Projekt **HERKULES** [3] war ein weiterer Erfolg. Den Forschenden steht damit ein Versuchsträger für grosse Dieselmotoren –Zylinderdurchmesser 50 cm- zur Verfügung. Noch weitere Arbeiten sind für die anspruchsvolle Erforschung der Peroxy Radikale im Zündvorgang erforderlich. In einem Nachfolgeprojekt sollen die im Projekt **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** [2] gewonnen Erkenntnisse mit der Nutzung der SLS Beamline des PSI eingesetzt werden. Erfreulich war die Beteiligung an der in geändertem Format durchgeführten Tagung **Verbrennungsforschung in der Schweiz** [6].

Ausblick

- Erarbeiteten des Detailprogramms für die Umsetzung der Forschungskonzepts 2008 – 11 und mit der CORE [14] abstimmen.
- Start diverser neuer Projekte im Rahmen der Schwerpunkte des Forschungskonzepts 2008 – 11
- Fortführen der Aktivitäten zur besseren Verbindung von Forschungsaktivität der Universitäten, des ETH-Bereichs, der Fachhochschulen und der Industrie.
- Verstärken der Kontakte zur Industrie.
- Starten eines Projekts zur Erfassung der in der Schweiz in der Verbrennungsforschung engagierten Personen (Stichwort: Who is Who in der Verbrennungsforschung Schweiz)
- Verbessern der Kommunikation über die Verbrennungsforschung in der Schweiz nach innen und nach aussen

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden

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

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

- [1] I. V. Karlin (karlin@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Lattice Boltzmann Simulationenmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** (SB).
- [2] T. Gerber et al., (thomas.gerber@psi.ch) PSI-Villigen: **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** (SB).
- [3] K. Hermann (hermann@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber** (SB).
- [4] A. Escher, (escher@lav.mavt.ethz.ch), K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** (JB).
- [5] 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).
- [6] **Tagung Verbrennungsforschung in der Schweiz**, Peter Jansohn PSI Villigen (peter.jansohn@psi.ch)

Liste der P+D-Projekte

Keine laufenden Projekte im 2007

Referenzen

- [7] **SVV** Schweizerischen Vereinigung für Verbrennungsforschung, LAV ETHZ <http://www.lav.ethz.ch>
- [8] **ERCOCTAC** European Research Community on Fluids, Turbulence and Combustion, Cordination Centre Fluid Mechanics Laboratory, EPF Lausanne. <http://www.ercotac.org>
- [9] **Hochschulkompetenzgruppe Verbrennungsmotoren** c/o J. Czerwinski, Abgasprüfstelle und Motorenlabor (AFHB), Hochschule für Technik und Informatik HTI, Biel (Jan.Czerwinski@bfh.ch)
- [10] 6. Rahmenprogram für Forschung und Entwicklung der EU <http://cordis.europa.eu/fp6>
- [11] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. **11th ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles, August 2007**
- [12] **IEA** Internationale Energieagentur <http://www.iea.org>
- [13] **WPFF** Working Party for Fossil Fuels der IEA <http://www.iea.org>
- [14] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011**, http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de&dossier_id=00798
- [15] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen **FVV**; <http://www.fvv.de>
- [16] **SLS Swiss Light Source VUV**; A beamline for Vacuum Ultraviolet Radiation; PSI Villigen <http://sls.web.psi.ch/view.php/beamlines/vuv/index.html>