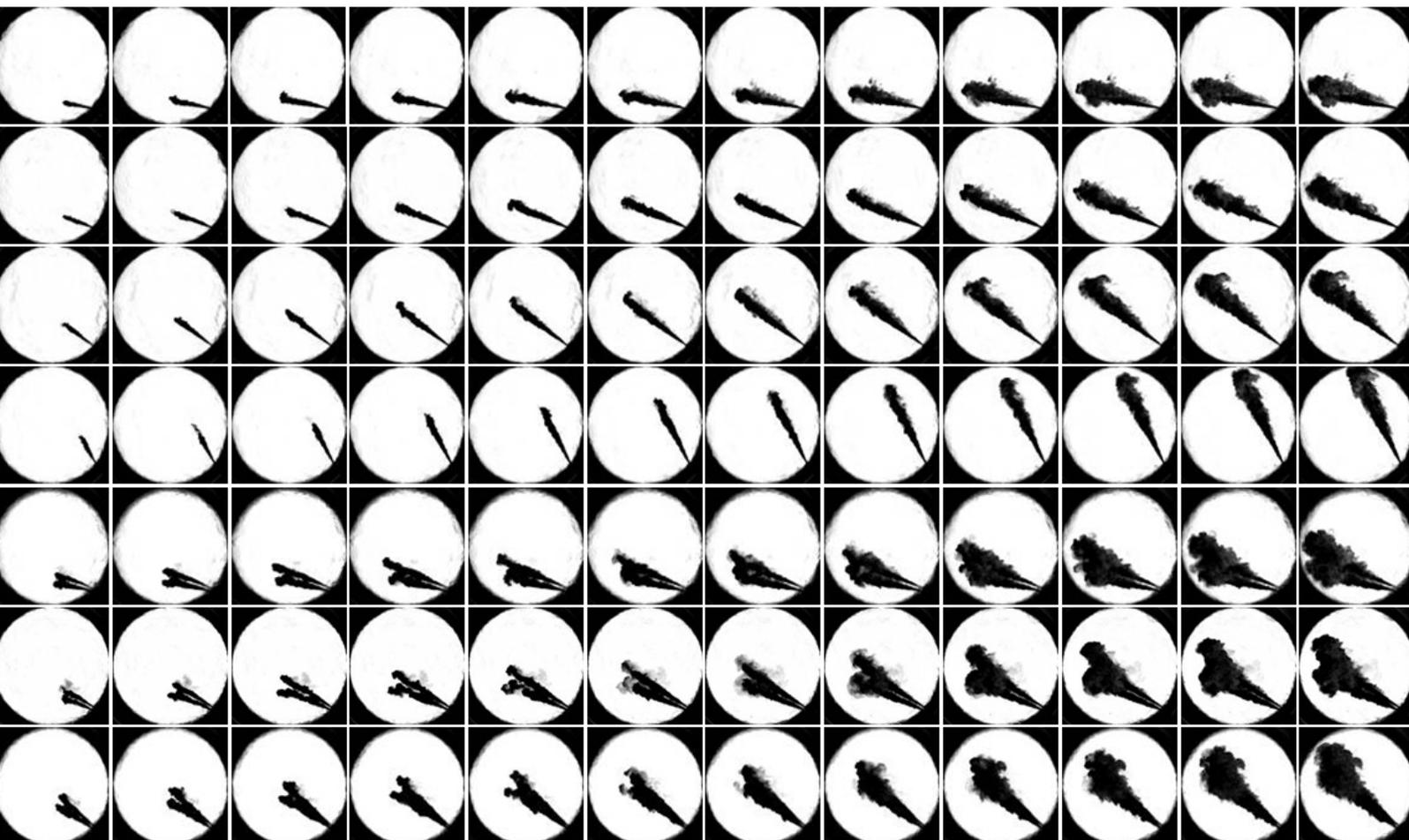


Überblicksbericht 2010

Forschungsprogramm Verbrennung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

Titelbild:**Schattenbilder der Einspritzung in eine Brennkammer**

Schattenbilder der zeitlichen Ausbreitung der Einspritzung (50 μ s) für eine Variation von Spray-Konfigurationen bei identischen Kammerbedingungen (9 MPa, 930 K) (Quelle: Wärtsilä Schweiz AG).

BFE Forschungsprogramm Verbrennung

Überblicksbericht 2010

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):

Stephan Renz, Beratung Renz Consulting (renz.btr@swissonline.ch)

Bereichsleiterin BFE:

Dr. Sandra Hermle (sandra.hermle@bfe.admin.ch)

www.bfe.admin.ch/forschunggeothermie/

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Einleitung

Die Verbrennung wird auch langfristig ein bedeutender Energieumwandlungsprozess sein, mit dem ein grosser Anteil der Energieformen Wärme und Kraft erzeugt wird. Neben den konventionellen fossilen Energieträgern Erdgas, Erdöl und Kohle werden in der Zukunft neue Brennstoffe an Bedeutung gewinnen. Dazu gehören auf Biomasse basierende Energieträger sowie aus verschiedenen Stoffen künstlich erzeugte, synthetische Brennstoffe. Hintergrund dieser Entwicklung ist die hohe Energiedichte der flüssigen Brennstoffe. Diese ist für viele Anwendungen wie Mobilität über grosse Distanzen (Transportwesen) oder Produktionsmaschinen mit langer Betriebsdauer (z. B. Baumaschinen) ausschlaggebend im Vergleich zu anderen Energieträgern. Die speziellen Anforderungen bei der Verbrennung werden in der Zusammensetzung der künstlichen Brennstoffe berücksichtigt, damit diese beispielsweise dank optimaler Verbrennung weniger Schadstoffe erzeugen.

Den fossilen Brennstoffen haftet der Mangel der langfristig begrenzten Verfügbarkeit sowie der CO₂-Emissionen an. Die Bestrebungen den Verbrauch durch höhere Effizienz und Substitution zu reduzieren, werden jedoch durch den globalen Zuwachs des Energiebedarfs mehr als übertroffen. 2010 stieg der Verbrauch an Erdölverbrauch in der Schweiz um 2 % und weltweit um 3 %. [1]

Die Schweiz ist Standort global agierender Hersteller von Verbrennungsmotoren und Gasturbinen. Dazu gehören Wärtsilä (marine Dieselmotoren), Liebherr Bulle SA, Fiat Power Train/Iveco, Wenko sowie Alstom. Auch zahlreiche Entwickler und Hersteller von peripheren Komponenten wie Turbolader, Einspritzsysteme, Katalysatoren, Partikelfilter, Mess- und Steuersysteme sind in der Schweiz aktiv. Hinzu kommen international anerkannte Kompetenzen in der Hochschulforschung. Dazu gehören Forschungsinstitute im ETH-Bereich und an Fachhochschulen.

Die vom Bund mitfinanzierte Verbrennungsforschung umfasst die Verbes-

serung der Forschungsmethoden und -instrumente, von Teilsystemen des Verbrennungsprozesses und der dazugehörenden Komponenten, wie auch von gesamten Systemen mit deren Interdependenzen. Ziele sind die Erhöhung des (exergetischen) Wirkungsgrads, die Verminderung des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen und damit der CO₂-Emissionen sowie die Reduktion von Schadstoffen wie Russ, Feinstaub, Stickoxid oder Kohlenwasserstoffe und die Optimierung von Verbrennungssystemen für alternative Energieträger. Die Forschungsziele stimmen mit den internationalen Bestrebungen überein. Dies zeigte sich beispielsweise am auf die Hochschulforschung fokussierten International Combustion Symposium, das im August 2010 in Peking [2] stattfand. Neben grundlagenorientierten Forschungsthemen wie Chemical Kinetics werden verstärkt auch Projekte mit neuen Brennstoffen präsentiert. Auch Schweizer Forschende waren an diesem Anlass mit Beiträgen vertreten.

Auch in Arbeitsgruppen der IEA [3], die sich mit der Verbrennung beschäftigen, sind Schweizer engagiert. Dazu gehören das IEA Implementing Agreement Combustion [4], welches die Ziele Reduktion der Schadstoffe, Verbesserung des Verbrennungsprozesses sowie Nutzung von alternativen Brennstoffen verfolgt, und das IEA Implementing Agreement Advanced Motor Fuels [5]. Auch in den industrienahen Forschungsprojekten der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [6] werden biogene und synthetische Brennstoffe zu einem stärker beachteten Thema. Mehrere Industrieunternehmen und Schweizer Hochschulforscher sind an FVV-Projekten beteiligt. Die Reduktion der Emissionen und die Nutzung weniger belastender Brennstoffe ist auch ein Thema im Bereich der Marineantriebe. Dies zeigte sich deutlich am alle drei Jahre stattfindenden CIMAC-Kongress [7], der sich mit der Entwicklung von Grossmotoren beschäftigt. Schweizer Industrie- und Forschungskompetenzen im Bereich der grossen Marinediesel waren an diesem Anlass im Einsatz.

IEA-Klassifikation: 2.1.4 Oil and gas combustion

Schweizer Klassifikation: 1.8 Verbrennung

Programmschwerpunkte

Die Verbrennung ist eine Querschnittstechnologie und weist zu zahlreichen anderen Forschungsprogrammen des BFE Verbindungen aus. Die Zielsetzungen des Programms richten sich nach dem Konzept der Energieforschung des Bundes [8] für die Periode 2008–2011.

Verbesserte Forschungsmethoden und -instrumente: Die Instrumente der Forschung wie physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger sind weiter zu entwickeln und an die gestellten Anforderungen anzupassen.

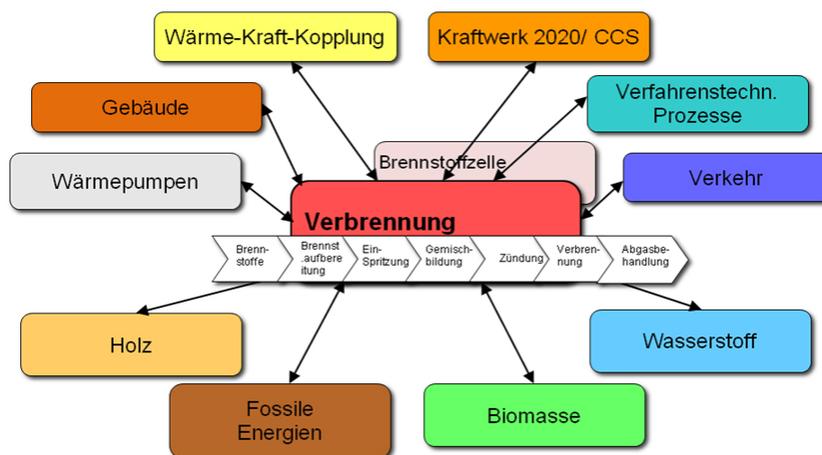
Erhöhung des Systemwirkungsgrads: Mit der Erhöhung des Wirkungsgrads werden der Brennstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen reduziert. Wichtig ist der Einbezug des Gesamtsystems und der unterschiedlichen Lastzustände.

Reduktion der Schadstoffemissionen: International werden die Emissionsvorschriften für Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxide sowie Russ und Feinstaub weiter verschärft. Zudem wird die Verminderung der Kohlendioxide gefordert.

Nutzung verschiedener Energieträger: Zur Verbesserung des Wirkungsgrads und zur Reduktion der Schadstoffe wird auch die Zusammensetzung der Brennstoffe geändert. Hinzu kommt die zunehmende Nutzung von biogene Brennstoffen.

Für die Periode 2008–2011 gelten folgenden Schwerpunkte:

- Weiterentwicklung der Forschungsmethoden und -instrumente für konventionelle und biogene Energieträger.
- Verbesserung und stärkere Vernetzung der experimentellen und numerischen Methoden für die Optimierung des Gesamtsystems «Motor», welches die Prozesskette Gemischbildung – Zündung – Verbrennung – Abgasnachbehandlung erfasst.
- Darstellung von «Null-Emission-Systemen» für die kleinskalige (10 kW bis 100 kW) kombinierte Strom-Wärme-Kälte-Erzeugung (inklusive Wärmepumpen und Biomasse) und für PW-Antriebe.
- Optimierung von Gemischaufberei-



... tung, Verbrennung und Abgasnachbehandlung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim (Teil-) Einsatz von biogenen Kraftstoffen.

- Optimierung von Gemischaufbereitung und Verbrennung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim Einsatz von konventionellen und biogenen Kraftstoffen in der atmosphärischen Verbrennung im kleinskaligen Bereich.
- Stärkere Vernetzung der Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung und -industrie inkl. Leistungserbringern von Komponenten.

Rückblick und Bewertung 2010

Schweizer Forschende konnten 2010 ihre Arbeiten an zahlreichen internationalen Tagungen präsentieren oder in Beiträge publizieren. Gefestigt wurde auch die Mitarbeit innerhalb des IEA Implementing Agreement Combustion [4], in dem verstärkt auch Themen der nachhaltigen Energieversorgung aufgenommen werden. Das abgeschlossene Projekt *INCA* brachte zwar noch nicht den erwünschten Erfolg mit einer katalytischen Umwandlung von Methan im Brennumraum, die robuste Beschichtung der Kolben ist jedoch gelungen. Vielversprechend ist der Fortschritt im Projekt *Energieeffiziente Dieselmotorenverfahren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung*, in dem in verschiedenen Teilprojekten Mess- und Rechenmodelle für den Abgleich der Schadstoffentstehung im Brennumraum mit der Abgasnachbehandlung erarbeitet werden. Im Projekt *BioExDi* wurden umfangreiche Messungen über den Einfluss von Diesel-

FAME-Gemischen auf die Abgasnachbehandlung durchgeführt. Interessant ist, dass die Russmissionen bei steigendem Bio-Anteil sinken. Der 2008 in Betrieb genommene sehr komplexe Versuchsträger für die Erforschung der Einspritzung, der Zündung und der Verbrennung in grossen Dieselmotoren hat sich in der Praxis bewährt. Die Charakterisierung der Einspritzung unter reaktiven und inerten Verhältnissen konnte durchgeführt und Datensätze für die Modellierung gewonnen werden.

Ausblick 2011

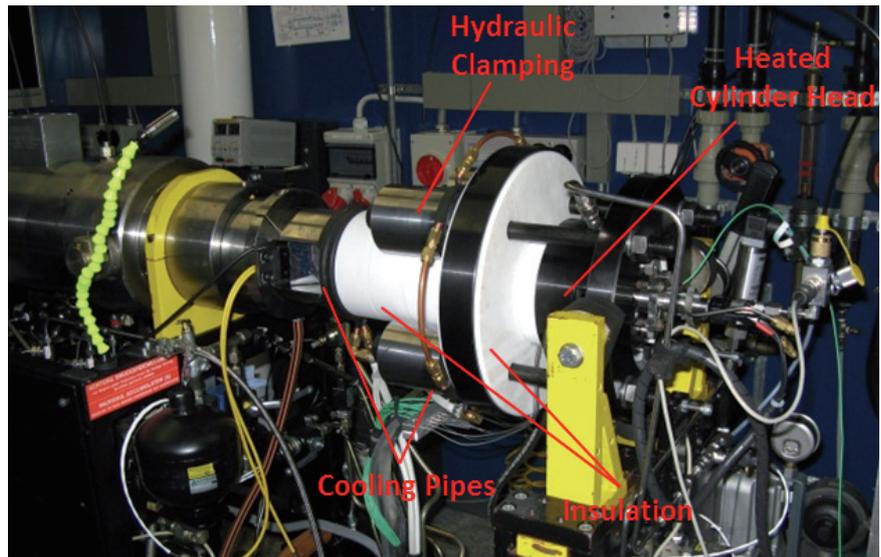
Mit einer weiteren Auflage der alle zwei Jahre stattfindenden Tagung «Verbrennungsforschung in der Schweiz» soll die Vernetzung von Forschenden aus Hochschulen und der Industrie weiter gestärkt werden. Die Erforschung der Reaktionsmechanismen im Zündprozess soll fortgesetzt und damit genauere Datengrundlagen für die Modellierung der Brennverfahren erarbeitet werden. Ein viel versprechendes Projekt zur Entwicklung kleinskaliger Verbrennungsmotoren für den Einsatz in Wärmekraftkopplungsanlagen oder als Range Extender für Elektromobile wurde 2010 zusammen mit Hochschul- und Industriepartnern initiiert und soll 2011 gestartet werden. Mit Interesse werden die Resultate aus dem erstmaligen Betrieb des Versuchsträgers «Einspritzbrennkammer grosser Schiffsdieselmotoren» mit Schweröl erwartet. Die Kontakte zur Industrie werden erweitert und es ist geplant, weitere Projekte mit der Zusammenarbeit von Industrie und Hochschulen zu initiieren.

Highlights 2010

Verbrennungssysteme sind auf einem hohen technischen Stand. Um diese weiter zu verbessern, und gleichzeitig die gestiegenen Anforderungen wie hoher Wirkungsgrad, minimierte Emissionen und Variabilität der Brennstoffe zu erfüllen, ist ein fundiertes Wissen erforderlich. Dazu gehört die Kenntnis über die thermochemischen Vorgänge im eigentlichen Verbrennungsprozess, die Kinetik der verschiedenen Stoffströme auch unter reaktiven Bedingungen, das Verhalten der Werkstoffe bei hohen und stark schwankenden Temperaturen und Drücken sowie die dynamischen und statischen mechanischen Vorgänge. Hinzu kommen die Interdependenzen über das gesamte Verbrennungssystem von der Gemischauflbereitung bis zur Abgasnachbehandlung und dies auch bei wechselnden Lastbedingungen. Die durch das BFE unterstützten Projekte umfassen deshalb Untersuchungen im Molekularbereich des Zündprozesses, die Entwicklung von numerischen Simulationsmodellen und von Versuchständen für die Validation, aber auch die Verbesserung von einzelnen Komponenten bis zum gesamten System. Projekte haben oft mehrere Themen zum Inhalt und fokussieren nicht nur auf eine Zielsetzung sondern auf Kombinationen davon. Dies weil beispielsweise die Verbesserung des Wirkungsgrads und die Reduktion der Schadstoffe gegenläufige Bestrebungen sind.

Alternative Brennstoffe stellen besondere Herausforderungen an Verbrennungssysteme

Die Substitution von fossilen Brennstoffen durch andere flüssige oder gasförmige Energieträger gewinnt zunehmend an Bedeutung. Neben der begrenzt verfügbaren Biomasse für die Herstellung von Ethanol, Biodiesel oder Biogas werden auch synthetisch hergestellte Energieträger untersucht. Beim «Design» von neuen Brennstoffen sollten die Eigenschaften und Anforderungen der Verbrennung möglichst gut berücksichtigt werden. Durch die unterschiedliche chemische Zusammensetzung alternativer Brennstoffe können diese nicht einfach in bestehenden Verbrennungssystemen eingesetzt werden. Eine Optimierung der



Figur 1: Einhubtriebwerk am LAV der ETHZ mit dem neuen Heizsystem. Damit werden der Zylinderkopf und der Zylinder vorgewärmt.

Systeme – von der Brennstoffaufbereitung bis zur Abgasnachbehandlung – an die spezifischen Eigenschaften des Brennstoffs ist notwendig. Dafür sind fundierte Kenntnisse über die Eigenschaften der Brennstoffe als auch der Verbrennungssysteme erforderlich.

Die Anforderungen neuer motorischer Brennvorgänge und die dafür relevanten Eigenschaften diverser Brennstoffe werden im Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* untersucht. Das Projekt ist mit dem Forschungsvorhaben Kraftstoffkennzahlen für homogene Verbrennung der FVV [6] verknüpft. Neben der Uni Duisburg-Essen, der RWTH Aachen und der Uni Stuttgart sind mehr als zehn europäische Industriefirmen an diesem Vorhaben beteiligt.

Mit homogenen Brennvorgängen (HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition) können die Stickoxid- und Russmissionen von Dieselmotoren massiv reduziert werden. Ungelöst ist die Kontrolle dieses Brennvorgangs besonders bei hohen Lasten, tiefen Drehzahlen oder bei instationärem Betrieb. Die Selbstzündung des Gemisches erfolgt oft zu früh, was zu hohen Druckspitzen und einem schlechten thermodynamischen Wirkungsgrad führt. Der heute in Dieselmotoren eingesetzte Kraftstoff eignet sich schlecht für das HCCI-Brennvorgang, da seine bei der dieselmotorischen Diffusionsverbrennung notwendige kurze Zünd-

verzugszeit im homogenen Betrieb (also bei langen Vormischzeiten) zu einer zu frühen Zündung des Gemisches führt. Neben der Optimierung des Motors wird für das HCCI-Brennvorgang deshalb auch der Einsatz speziell geeigneter synthetisch hergestellter Brennstoffe geprüft. Dafür ist es notwendig, die Eigenschaften der verwendeten Brennstoffe gut – idealerweise mit einer oder mehreren Kennzahlen – zu beschreiben. Im Projekt werden deshalb experimentelle und theoretische Untersuchungen für 10 verschiedene Brennstoffe bearbeitet. Die Experimente werden am Einhubtriebwerk der ETH durchgeführt (Fig. 2). Das Triebwerk wurde mit einer Beheizung ausgerüstet, um auch erst bei höheren Temperaturen verdampfende Brennstoffe bei guten homogenen Bedingungen untersuchen zu können.

Das Triebwerk wurde für n-Heptan justiert und das Zündverhalten konnte weitgehend charakterisiert werden. Für die numerische Simulation der Selbstzündung und Verbrennung des Kraftstoff-Luftgemisches wurden anstelle der sehr komplexen Reaktionsmechanismen für den Einsatz in 3D-CFD-Simulationen zwei phänomenologische Modelle entwickelt. Durch die Kopplung der Modelle mit 3D-CFD-Simulationen wurde eine gute Übereinstimmung mit den Messresultaten erreicht. Die innermotorischen Abläufe können damit im nächsten Projektschritt detailliert untersucht werden.



Figur 2: Prüfstand mit Liebherr 4-Zylinder-Dieselmotor D934 S mit Direkteinspritzung und Turbolader. Angebaut wurde ein Diesel Oxidation Catalyst (DOC) + Catalyzed Soot Filter (CSF) System HUG mobilclean RS. Gemessen wurde mit Brennstoffen Diesel, RME (Rapsmethylester) 7, 20, 30 und 100.

Die Auswirkungen von Brennstoffmischungen auf der Basis von Diesel und FAME (Fatty Acid Methyl Ester) auf den Betrieb von Abgasnachbehandlungssystemen (Katalysator und Dieselpartikelfilter) wurde im Projekt BioExDi untersucht (Fig. 3). Abgeklärt wurde auch der Einfluss der Biokomponenten auf die Regenerationsvorgänge und die Ablagerungen im Partikelfilter. Das Projekt wird unter der Leitung des AFHB [9] zusammen mit der Empa [10], Hug-Engineering AG [11] und der finanziellen Unterstützung durch BAFU [12], BFE und Erdölvereinigung [13] bearbeitet. Als Zwischenergebnis wurde festgestellt, dass bei steigendem biogenem Anteil im Brennstoff die Russpartikel reaktiver sind. Dadurch beginnt die Regeneration bei tieferen Temperaturen und ist intensiver. Die Partikelemissionen des Motors waren mit höherem Bio-Anteil zudem geringer. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Qualität von Biodiesel sehr unterschiedlich ist und Additive zur Verbesserung der Eigenschaften (Kälte- und Wärmeverhalten, Alterung) Probleme im Abgas verursachen können. Gegenüber den geringen Russablagerungen wurde jedoch eine starke Zunahme der Aschemenge bei höherem Bio-Anteil festgestellt. In der Praxis werden jedoch nur Brennstoffe mit geringem Bio-Anteil (B7 = 7 % oder B20 = 20 %) eingesetzt.

Die starke Wärmedämmung von neuen und die wärmetechnische Sanierung von bestehenden Gebäuden bewirkt eine zunehmende Reduktion des Bedarfs an Heizleistung. Hinzu kommt, dass häufig additive Heizungssysteme eingesetzt werden und dadurch die konventionellen Heizkessel oft mit Teillast betrieben werden. Bei Ölheizungen liegt die untere Leistungsgrenze bei 10 kW. Bei geringerem Bedarf müssen diese im verlustreichen Ein-/Ausschaltbetrieb laufen. Dies gilt für fossile als auch für biogene flüssige Brennstoffe. Anstelle der Zufuhr durch eine Düse muss der Brennstoff für geringere Leistungen vor der Gemischbildung verdampft werden. Im Projekt *Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT)* werden zwei verschiedene Verdampfungssysteme untersucht. Beim im ThermMix-Konzept eingesetzten Brenner der Schweizer Firma Toby wird das Öl nach der Zentrifugalzerstäubung auf einer durch Rauchgasrückführung beheizten Wand verdampft. Beim Catvap-Brenner fließt ein Teilstrom des Brennstoffs über eine katalytische Schicht. Durch die Strahlungswärme der katalytischen Oxidation wird der übrige Brennstoff verdampft.

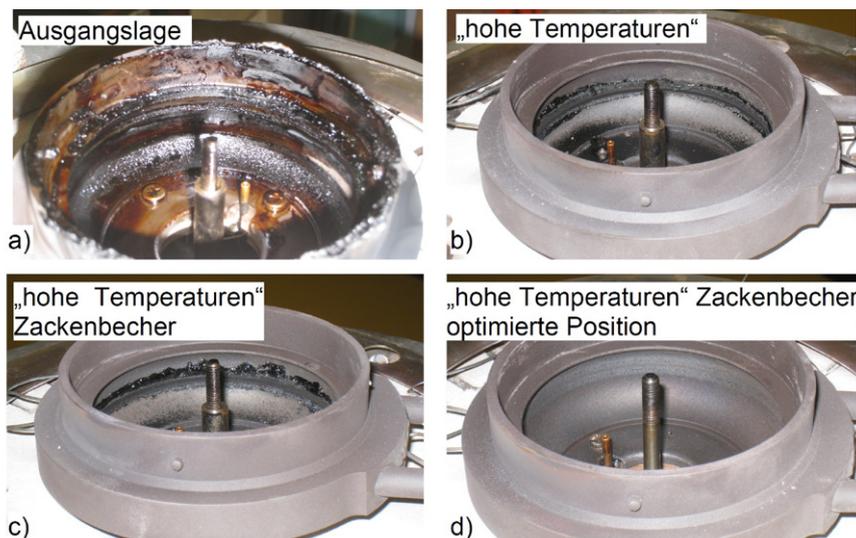
Die untersuchten Brennstoffe sind Mischungen aus Heizöl EL schwefelarm und FAME. Für das ThermMix Konzept wurde ein optimierter Zerstäuberbecher entwickelt, mit dem kleinere Tropfen

mit einem schmäleren Tropfen-größenverteilungsspektrum erzeugt werden können.

In Einzeltropfenverdampfungsversuchen mit einer Tropfengröße von 120 bis 500 µm wurde festgestellt, dass die Wandtemperatur der Verdampferfläche einer der entscheidenden Parameter für eine rückstandsfreie Verdampfung ist. Für Tropfen mit einem Durchmesser von 500 µm liegt diese oberhalb von 430 °C und somit im Bereich der Leidenfrosttemperatur (430 bis 440 °C). Unterhalb dieser Temperatur ist die Neigung zur Bildung von Ablagerungen stark vom FAME-Anteil abhängig.

Mit der Verdampfung eines Brennstofffilms durch Wärmestrahlung nach dem Konzept «CatVap» konnte keine abgelagerungsfreie Verdampfung erreicht werden. Die Hauptproblematik liegt im Prozess selbst, bei dem der Brennstoff eine lange Zeit als Flüssigkeitsfilm einer hohen Temperatur ausgesetzt ist. Dies führt durch partielle Verdampfung der leicht siedenden Komponenten zu einer Aufkonzentrierung der schwer siedenden Komponenten. Diese Aufkonzentrierung führt zu einer Erhöhung der Viskosität und somit zu starken Ablagerungen.

In den untersuchten Temperaturbereichen findet sowohl Benetzung der Fläche (Übergangssieden im CatVap) als auch Verdampfung von sphärischen Flüssigkeitskugeln (Filmsieden oberhalb der Leidenfrosttemperatur



Figur 3: Vorverdampferwand eines Toby-Brenners nach dem ThermMix-Konzept. Messung mit FAME: (a) Standardkonfiguration; (b) hohe Zündtemp. und Nachheizen; (c) «hohe Temperaturen» und Zackenbecher; (d) «hohe Temperaturen», Zackenbecher aufgespreizt und nach unten versetzt (Messdauer 1 Std., Leistung 15 kW).



Figur 4: Die mit einer katalytischen und isolierenden Schicht versehenen Kolben eines 4-Zylinder-VW-Motors nach dem Versuch (28 Stunden Betrieb). Die dunklen Stellen am Rand stammen vom Motorenöl beim Ausbau der Kolben.

im ThermMix) statt. In den Messungen konnte gezeigt werden, dass eine Benetzung der Verdampferfläche verstärkt zur Bildung von Ablagerungen führt. Eine ablagerungsfreie Verdampfung konnte für Mischungen mit einem FAME-Anteil bis 50 % erreicht werden, wenn eine Benetzung verhindert werden konnte.

Durch die Optimierung des realen Systems, dem Tobybrenner des ThermMix-Konzepts, konnte ein stabiler Betrieb erreicht werden (Fig. 4).

Erdgasbetriebene Fahrzeuge haben in der Schweiz einen noch geringen Marktanteil. Die Motoren sind angepasste Benzinmotoren und nicht vollständig auf den gasförmigen und kohlenstoffarmen Brennstoff ausgelegt. Ein Problem ist der Methanschleupf, der die Vorteile der geringeren CO₂-Emissionen schmälert. Im Projekt INCA wurden Kolben eines Gasmotors katalytisch und isolierend beschichtet. Ziel war es, einen Teil des Methans im Zylinder katalytisch umzuwandeln und

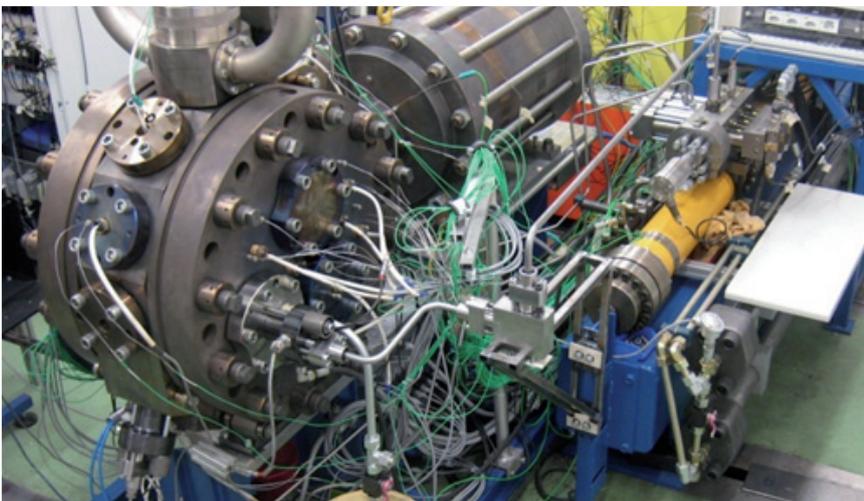
die Wärmeverluste zu verringern. Es konnte eine stabile Beschichtung entwickelt werden, die eine leichte Verbesserung des Wirkungsgrads bewirkt. Der Vorteil der katalytischen Wirkung wird jedoch durch die Aufnahme von Methan in der porösen katalytischen Schicht mehr als zunichte gemacht. In weiteren Untersuchungen sollte deshalb die Struktur der Zirkonoxydschicht verändert werden, damit die schwammartige Aufnahme von Methan vermieden wird.

Einblicke in den Brennraum grosser Schiffsdieselmotoren

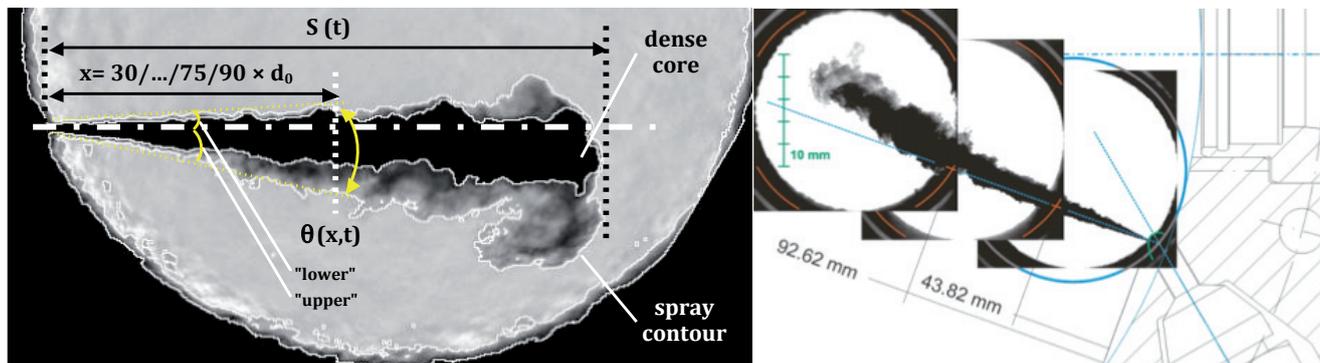
Die Schweiz verfügt über eine langjährige Tradition in der Entwicklung von Schiffsdieselmotoren. Nach wie vor werden Grossmotoren mit einer Leistung bis über 80'000 kW entwickelt und zahlreiche Zulieferer von Komponenten wie Einspritzsysteme

oder Turbolader sind aktiv. An den Hochschulen sind ausgewiesene Forschungskompetenzen vorhanden. Alternativen für den effizienten Antrieb von Schiffen für den weltweiten Gütertransport werden die Schiffsmotoren trotz gestiegener Erdölpreise noch für längere Zeit nicht ersetzen können. Neben der Anforderung zur weiteren Verbesserung des Wirkungsgrads ist in den kommenden Jahren die Reduktion der Schadstoffemissionen ein zentrales Thema. Die in der Grossschiffahrt eingesetzten Treibstoffe (MFO Marine Residual Fuel Oil = Schweröl) sind Abfallprodukte aus den Raffinerien. Um in der Küstennähe die Emissionen zu reduzieren, werden dort andere Brennstoffe eingesetzt. Das Verhalten der Einspritzung und der Verbrennung in grossen Motoren konnte bisher noch kaum visualisiert werden. Um numerische Modelle für die Entwicklung verbesserter Systeme zu validieren, ist der Einblick in die Brennkammer essenziell.

Im EU-Projekt *HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships)* [14] werden neue Technologien für die Reduktion der Schadstoffemissionen und die Erhöhung des Wirkungsgrads grosser Schiffsdieselmotoren entwickelt. Die Schweizer Projektteilnehmer Wärtsilä Schweiz AG, ABB Turbosystems AG, das LAV der ETHZ, das PSI und die Empa befassen sich in einem Teilprojekt mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für deren Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Dafür wurde ein Versuchsträger (Fig. 6), der das Verbrennungssystem grosser 2-Takt-Schiffsdieselmotoren (Bohrung 500 mm) repräsentiert, entwickelt. Im Projektteil *Weiterentwicklung eines Referenzexperiments (Spray Combustion Chamber)* in Bezug auf die Optimierung des Verbrennungssystems von Grossdieselmotoren



Figur 5: Einspritzbrennkammer für grosse Schiffsdieselmotoren mit einer Bohrung von 500 mm, instrumentiert mit einer 1-Loch-Einspritzdüse und dem Rücklauf für das überschüssige Öl. Sichtbar sind auch die Vorwärmkammer (bis über 900 K) und die adaptierte Commonrail-Einspritzung.



Figur 6: Analyse der Spray-Ausbreitung hinsichtlich Eindringtiefe und Öffnungswinkeln (total, «oberer», «unterer») basierend auf zwei Grenzwerten (Spray-Kontur, «dichter Kern») und weitere Bildverarbeitung.

wird das Zündverhalten verschiedener Brennstoffe (von Schweröl bis handelsüblichem Dieselmotorkraftstoff) untersucht, die Anlage durch neuartige Komponenten wie Probeentnahmesonde und Schaugläser erweitert und Einspritzdüsen, die später für die eigentliche Produktentwicklung genutzt werden, verbessert. Zudem werden die optischen Messtechniken weiterentwickelt.

2010 konnte die Ausbreitung unterschiedlichster Sprays (Ein- bis Mehrlochdüse, Einspritzwinkel) mit Hilfe der Schattenbild-Methode sowohl unter reaktiven als auch bei inerten Bedingungen visualisiert und erfasst werden (siehe Titelbild). Messungen unter Variation von Druck und Temperatur (bis 9 MPa, 930 K), Anzahl der Düsenlöcher sowie der Richtung (10° in Gegendrall- bis 40° in Drallrichtung) einer 1-Loch-Düse relativ zur Gasströmung im nicht-reaktiven Fall führten nach einer umfassenden Analyse zu genaueren Erkenntnissen im Hinblick auf die Entwicklung des Sprays (Fig. 7). So konnten Eindringtiefe, Öffnungswinkel sowie Einfluss des Dralls bestimmt werden. Mit Lasermessungen konnten mit der «Mie-Streuung»-Methode erste Untersuchungen des Einflusses exzentrischer Düsenlöcher auf die Entwicklung des Sprays bzw. auf die Flammenausbreitung durchgeführt werden. Die Versuchsanlage wurde zudem erweitert, um unter realen Bedingungen Schweröl einzuspritzen.

Zyklusgenaue Steuerung von Verbrennung und Abgasnachbehandlung

Durch die weitere Verschärfung der Emissionsvorschriften für «Medium»- und «Heavy Duty»-Dieselmotoren müssen beispielsweise ab 2013 die

NOx-Emissionen von heute 2,0 g/kWh auf 0,4 g/kWh und die Russmissionen von 0,2 g/kWh auf 0,1 g/kWh reduziert werden [14]. Um insbesondere die Emissionen im transienten Betrieb (Laständerung) zu senken, müssen das Verbrennungssystem und die Abgasnachbehandlung laufend – im Idealfall pro Zyklus und Zylinder – aufeinander abgestimmt werden können. Dafür sind genaue Informationen über die Russbildung im Zylinder zu erfassen und mit schnellen Rechenverfahren die Steuerung der Verbrennung anzupassen und die Abgasnachbehandlung darauf abzustimmen.

Diese Anforderungen werden im Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselmotoren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung* des LAV der ETHZ bearbeitet. Das Projekt besteht aus fünf Arbeitspaketen, die teilweise auf Ergebnisse von vorangehenden Projekten zurückgreifen und mit diversen laufenden Projekten verknüpft sind. Dazu gehören das FVV-Projekt Russ geregelter Dieselmotor [6] und ein KTI-Projekt [15]. Weitere sind nachfolgend erwähnt.

Als Prüfstand wurde ein 4-Zylinder Dieselmotor von Liebherr vollständig instrumentiert und mit am LAV entwickelter Software in Betrieb genommen. Der Motor ist auf allen Zylindern indiziert und mit einer Common-Rail-Einspritzung ausgerüstet. An einem als Versuchsstand umgebauten 1-Zylinder-Dieselmotor von MTU wurde das im Projekt *Darstellung des Technologiepotentials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂ Ausstoss* vom LAV in Zusammenarbeit mit der Firma Kistler entwickelte schnelle Entnahmeventil erstmals für

Messungen eingesetzt. Mit weiterer Messinstrumentierung wie Druckindizierung, Gasanalytik, miniaturisiertes Drei-Wellenlängen-Pyrometer sowie Messungen der Russmissionen im Auspuff wurde eine breit angelegte Messkampagne durchgeführt. Die Ergebnisse dienen als Input für die Weiterentwicklung der Rechenverfahren. Der Einzylindermotor dient auch dem vom BFE mitfinanzierten Projekt *CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren*. Das weiter entwickelte Russbildungsmodell zeigt im Vergleich zu den Messungen eine sehr gute Übereinstimmung. Wichtig ist die Simulation eines SCR-deNOx-Katalysators unter transienten sowie hoch dynamischen, motorisch relevanten Betriebsbedingungen. Hierzu wurde von Grund auf ein Modell für Einzelkanäle eines Fe-Zeolith-Katalysators entwickelt, welches anhand eines umfassenden Datensatzes vom PSI validiert wurde. Die entwickelte Systematik zur Bestimmung der zahlreichen Modellparameter mittels genetischer Algorithmen wurde erfolgreich in ASME-IMECE [16] plaziert; die transienten Resultate sind eingereicht für die JSAE Conference 2011 [17] und die hoch-dynamischen Validierungsergebnisse sind in Vorbereitung für das International Journal of Engine Research [18]. Dieses Arbeitspaket weist mit zwei vom Competence Center for Energy and Mobility [19] co-finanzierten, aufeinander aufbauenden Projekten (CCEM-NEADS und CCEM-NaDiP) grosse Synergien auf und hat zu sehr fruchtbaren Zusammenarbeiten mit den experimentellen Gruppen am PSI und an der Empa geführt.

Nationale Zusammenarbeit

Die Forscherteams der Schweizer Verbrennungsforschung pflegen über zahlreiche gemeinsame Projekte gute Kontakte. Dazu gehören verschiedene vom BFE mitfinanzierte Projekte. Zu nennen sind das Projekt *HERCULES*, in dem die ETHZ, das PSI sowie Wärtsilä Schweiz AG und ABB Turbosystems AG Partner sind. Zahlreiche Industriepartner sind im Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselmotoren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung* direkt oder indirekt involviert. Dazu gehören Kistler Instrumente AG, Iveco Motorenforschungs AG, Liebherr Machines Bulle SA und Hug Engineering AG. Das Projekt *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* ist Teil des vom CCEM geführten Projekts Clean Efficient Large Diesel Engine (CELaDE) in dem eine Zusammenarbeit zwischen der ETHZ, dem PSI und der Empa erfolgt. Im Projekt *INCA* erfolgt eine Zusammenarbeit zwischen der Empa, der ETHZ und Nova Werke AG. Im Projekt *BioExDi* arbeitet die Fachhochschule Biel mit der Empa und Hug Engineering AG zusammen. Das Projekt wird vom Forschungs-

programm Biomasse mitfinanziert und erhält zudem Mittel vom Bundesamt für Umwelt und von der Erdölvereinigung [11]. Das an der Fachhochschule Nordwestschweiz bearbeitete Projekt *Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT)* stützt sich auf die Zusammenarbeit mit der Firma Toby AG als Lieferant der Brenner und dem Verein Bio-Fuel als Lieferant der Bio-Brennstoffe. Das Projekt wird von der Erdölvereinigung mitfinanziert.

Jährlich wird an der ETHZ die *Conference on Combustion Generated Nanoparticles* die Problematik der durch die Verbrennung erzeugten Partikel interdisziplinär behandelt. Die Themen der Referate spannten den Bogen von der Partikelentstehung in der Verbrennung, über die Abgasnachbehandlung, zur Messtechnik sowie zu den atmosphärischen Vorgängen und zu den biologisch-medizinischen Wirkungsaspekten. Die von der ETHZ mit TTM organisierte Veranstaltung findet national wie international bei technisch wie auch medizinisch orientierten Forschern grosses Interesse.

Internationale Zusammenarbeit

In mehreren vom BFE unterstützten Projekten erfolgt eine internationale Zusammenarbeit mit Hochschulen und Industriepartnern. Dazu gehört das von der EU im Rahmen der Forschungsprogramme FP6+7 mitfinanzierte Projekt *HERCULES* [14]: Neben den bereits erwähnten Schweizer Forschungsinstitutionen und Industriepartnern sind auch die Abo Akademi University (FIN), die Helsinki University of Technology (FIN), die National Technical University of Athens (GR) sowie die Wärtsilä Corporation Finnland beteiligt. Das Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* war Teil einer internationalen Ausschreibung der FVV [6]. Das LAV der ETHZ erhielt den Zuschlag, was seine Kompetenz und die internationale Konkurrenzfähigkeit bestätigt. Eine Zusammenarbeit erfolgt mit den Universitäten Duisburg und Stuttgart sowie der Technischen Hochschule Aachen. Auch das Projekt *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* wird parallel zu Projekten der FVV bearbeitet, mit entsprechender Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen in Deutschland.

Ein wichtiger Informationsaustausch und die Gelegenheit, die Schwerpunkte der Verbrennungsforschung international mitzugestalten, erfolgt in der Mitarbeit in Arbeitsgruppen der Internationalen Energieagentur (IEA) [3]. Für die Verbrennung relevant sind das *Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion* (IEA Combustion) [4], die *Working Party for Fossil Fuels* (WPPF) [20] und das *Implementing Agreement Advanced Motor Fuels* (AMF) [5]. Die Schweiz ist in diesen Arbeitsgruppen vertreten.

Grössere Aktivitäten von Schweizer Vertretern erfolgen im IEA Combustion. Deren Ziel ist, die Entwicklung von Verbrennungstechnologien, die einen verminderten Brennstoffverbrauch und geringere Partikelemissionen aufweisen, voranzutreiben. Die Forschungsthemen werden in sogenannten Collaborative Tasks bearbeitet. Dazu gehören Gas Turbines, Sprays in Combustion, Alternative Fuels in Combustion und Nanoparticle Diagnostics, zu denen Schweizer Forschende Beiträge leisten, sowie Hydrogen Internal Combustion Engines und Homogeneous Charge Compression Ignition. Die Mitarbeit der Schweiz sichert eine Vertretung der Interessen im Bereich Verbrennung, eine Mitwirkung bei der Festlegung zukünftiger Schwerpunkte, die Vermittlung schweizerischer Forschungsergebnisse, die Bekanntmachung der Firmen aus der Schweiz sowie die Weitergabe der Informationen über internationale Aktivitäten an Interessierte in der Schweiz. Im IEA Combustion sind 12 Mitgliedsländer vertreten.

Im IEA AMF Agreement ist die Schweiz im Executive Committee und in Arbeitsgruppen vertreten. 2010 konnte das vom AFHB in Zusammenarbeit mit Universitäten in Graz, Neapel, Dänemark, dem EC JRC in Ispra und diversen Industriepartnern bearbeitete Projekt über die Schadstoffemissionen von mit Zweitaktmotoren angetriebenen Rollern abgeschlossen werden. Neu hat die Schweiz den *Annex Toxicity of Exhaust Gases and Particles from IC Engines - International Activities Survey* (EngToxIn) initiiert und die Leitung übernommen.

Die WPPF der IEA, welche unter anderem die *Implementing Agreements Greenhouse Gas R&D Programme*, En-

hanced Oil Recovery und das Clean Coal Centre unter sich vereint, richtet ihre Berichte an das Committee on Energy Research and Technology (CERT). Wichtige Themen sind die Verbesserung des Wirkungsgrad von grossen mit fossilen Brennstoffen befeuerten Kraftwerken und in diesem Kontext Verfahren zur Elimination des CO₂. In neueren Überlegungen fliessen auch Aspekte der Nutzung von CO₂ – beispielsweise in Gewächshäusern – mit ein.

Schweizer Forschende nahmen auch an zahlreichen internationalen Symposien und Tagungen mit Referaten

und Posterpräsentationen im Kontext mit vom BFE mitfinanzierten Projekten teil. Dazu gehörten International Combustion Symposium, 26th CIMAC-World-Congress, die FVV-Tagungen, das 1st Large Engine Symposium, ILASS - Europe 2010, 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 19th Discrete Simulation for Fluid Dynamics conference (DSFD 2010), und 63rd Annual meeting of the American Physical Society APS division of Fluid Dynamics, um nur einige zu nennen.

Schweizer Beteiligung im IEA Implementing Agreement Combustion

<http://ieacombustion.net>

Annex / Task	Schweizer Delegierter
Gas Turbine Combustion for Zero Emission Power Plants	Paul Scherrer Institut
Sprays in Combustion	ETH Zürich
Alternative Fuels	ETH Zürich

Referenzen

[1] *Marktentwicklung fossiler Energieträger 1/2011: Der Verbrauch fossiler Energie steigt wieder stark an*, Bundesamt für Energie, 1.3.2011

[2] *The Combustion Institute, 33rd International Combustion Symposium, Peking, 2011* (www.combustioninstitute.org)

[3] *International Energy Agency* (www.iea.org)

[4] *International Energy Agency Implementing Agreement for Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion (IEA Combustion)* (ieacombustion.net)

[5] *International Energy Agency Implementing Agreement on Advanced Motor Fuels* (www.iea-amf.vtt.fi)

[6] *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.* (www.fvv-net.eu/)

[7] *CIMAC, The International Council on Combustion engines* (www.cimac.com/)

[8] *Eidgenössische Energieforschungskommission CORE: Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011*, Bundesamt für Energie, 2007

[9] *Berner Fachhochschule Technik und Informatik TI Abgasprüfstelle und Motorenlabor (AFHB), Nidau* (labs.hti.bfh.ch/?id=abgaslabor)

[10] *Empa, Abteilung Verbrennungsmotoren* (www.empa.ch)

[11] *Hug Engineering AG, Elsau* (www.hug-eng.ch)

[12] *Bundesamt für Umwelt, Bern* (www.bafu.admin.ch/)

[13] *High-efficiency Engine R&D on Combustion with Ultra-low Emissions for Ships (HERCULES), EU-FP6*

[14] *EU Emission Standards for HD Diesel Engines: VERORDNUNG (EG) Nr. 595/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Juni 2009*

[15] *KTI-Projekt Nr. 10604.1 «Entwicklung eines Markttauglichen Messsystems zur Erfassung der Inzylinder Russkonzentration und -temperatur»*

[16] *Sharifian L., et al.: «Simulation of NOx reduction in an Ammonia-SCR system with a Fe-Zeolite catalyst and calibration of related parameters», Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, paper No. IMECE2010-40431*

[17] *Sharifian L., et al.: «Transient simulation of NOx reduction in an NH3-SCR system over Fe-Zeolite catalyst and study of the performance under different operating conditions», in preparation for JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting 2011, JSAE Paper offer No. 201119195*

[18] *Sharifian L., et al.: «Calibration of an NH3-SCR system including NO oxidation and simulation of NOx reduction over Fe-Zeolite catalyst in highly transient conditions», in preparation for International Journal of Engine Research*

[19] *Competence Center Energy and Mobility (CCEM) Project Next Generation Exhaust Aftertreatment for Diesel Propulsion Systems (NEADS) and NOx Abatement in Diesels (NaDiP)* (www.ccem.ch)

[20] *International Energy Agency Working Party on Fossil Fuels (IEA-WPFF)* (www.iea.org)

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- BRENNSTOFFE FÜR HOMOGENE, SELBSTGEZÜNDETE VERBRENNUNGSPROZESSE** R+D 2.1.4*

Lead: ETHZ – Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period: 2005–2010

Abstract: Theoretische und experimentelle Untersuchung der Selbstzündungs- und Verbrennungseigenschaften von Brennstoff-Luft Gemischen wie sie in Verbrennungsmotoren im selbstgezündeten, homogenen Betriebsbereich (HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition) vorhanden sind. Mit dem Ziel eine geeignete Kennzahl zu definieren, die das Selbstzündungsverhalten der Kraftstoffe unter HCCI Bedingungen gut charakterisieren kann werden 10 Brennstoffe untersucht.
- ERWEITERUNG UND VALIDIERUNG DER CRFD-SIMULATION FÜR NEUE MOTORISCHE BRENNVERFAHREN UND KRAFTSTOFFE** R+D 2.1.4

Lead: ETHZ – Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period: 2008–2011

Abstract: Erweiterung von Simulationswerkzeugen und deren experimentellen Validierung für neue Kraftstoffe und entsprechend ausgelegte Brennverfahren. Motorischen Experimente werden an einem neuen Versuchsträger zur Validierung der Simulation für grössere Dieselmotoren durchgeführt. Optische Experimente an Modellbrennkammern liefern zusätzlich Daten zum grundlegenden Verständnis des Zünd-, Verbrennungs- und Emissionsverhaltens neuer, synthetische Kraftstoffe.
- ENTWICKLUNG SCHNELLER MESS- UND RECHENVERFAHREN FÜR DIE CHARAKTERISIERUNG VON DIESELBRENNVERFAHREN AN DER NAHTSTELLE ZUR ABGASNACHBEHANDLUNG** R+D 2.1.4

Lead: ETHZ – Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period: 2008–2011

Abstract: Entwicklung schneller messtechnischer und Modellierungsmethoden zur Optimierung des Zusammenspiels zwischen motorischem Brennverfahren und Abgasnachbehandlung, insbesondere der SCR-basierten Entstickung von «medium»- und «heavy-duty» Dieselmotoren. Ziel ist die Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften (z. B. EURO 6) möglichst mit einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads (CO₂-Reduktion).
- GRUNDLAGEN ZUR ERWEITERUNG DES LEISTUNGSBEREICHS UN DER BRENNSTOFF-FLEXIBILITÄT VON ÖLBRENNERN MIT VORVERDAMPFERTECHNIK (VVT)** R+D 2.1.4

Lead: FHNW – Institut für Thermo- und Fluid-Engineering	Funding: BFE
Contact: Griffin Timothy timothy.griffin@fhnw.ch	Period: 2008–2011

Abstract: Untersuchung der rückstandsfreien Verdampfung von biogenen Brennstoffen wie FAME, FMEE, RME oder AME in zwei verschiedene Verfahren der VVT. Toby-Verfahren: Zentrifugalzerstäubung mit einem rotierenden Becher und Oberflächenverdampfung durch Wärmeleitung. CatVap Verfahren: Katalytischen Reaktion an einer beschichteten Oberfläche eines kleinen Teils des Brennstoffs und Nutzung der entstandenen Wärme zur Verdampfung des übrigen Brennstoffs.
- MODELING OF ENERGY CONVERSION PROCESSES AT THE MICROSCALE** R+D 2.1.4

Lead: PSI – Combustion Research	Funding: BFE
Contact: Mantzaras Ioannis ioannis.mantzaras@psi.ch	Period: 2009–2012

Abstract: Entwicklung numerischer Modelle zur Darstellung der wichtigsten Prozesse von thermochemischer und elektrochemischer Energieumwandlung in Mikrokanälen. Entwicklung neuer Lattice Boltzmann Modelle für Multispezies, nicht isotherme, reaktive und komplexe dreidimensionale Mikroströmungen. Das resultierende Berechnungsmodell wird auch für die Simulation von chemisch reaktiven Strömungen genutzt werden können.
- INFLUENCES OF BIOCOMPONENTS (FAME) ON EMISSIONS AND ON EXHAUST SYSTEMS OF HD-DIESEL ENGINES (BIOEXDI)** R+D 2.1.4

Lead: BFH TI – Abgasprüfstelle und Motorenlabors (AFHB)	Funding: BFE
Contact: Czerwinski Jan Jan.Czerwinski@bfh.ch	Period: 2009–2010

Abstract: Untersuchung der Auswirkungen von Kraftstoffen mit zugemischten Biokomponenten (RME) auf die Abgasnachbehandlungssysteme von Dieselmotoren. Versuche und Messungen mit B0, B7, B20, B30, B100 mit/ ohne Katalysator (SCR) und Dieselpartikelfilter (DPF). Untersuchung der Regenerationsvorgänge und Ablagerungen im DPF.
- INSULATED AND CATALYST-COATED PISTONS (INCA)** R+D 2.1.4

Lead: EMPA – Verbrennungsmotoren	Funding: BFE
Contact: Bach Christian christian.bach@empa.ch	Period: 2009–2010

Abstract: Untersuchung von keramisch isolierten und katalytisch beschichteten Kolben im ottomotorischen Betrieb mit Methan. Ziele sind Verbesserung der Abgasemissionen (unverbranntes Methan) und Erhöhung des Wirkungsgrads. Durchführung vergleichender Messungen am Motorenprüfstand mit herkömmlichen und beschichteten Kolben. Auswertung der Messwerte werden zur Quantifizierung der Auswirkungen auf thermischen Wirkungsgrad, Brennverlauf, Verluste, Schadstoffemissionen.

● **WEITERENTWICKLUNG EINES REFERENZEXPERIMENTS («SPRAY COMBUSTION CHAMBER») IN BEZUG AUF DIE OPTIMIERUNG DES VERBRENNUNGSSY (HERCULES)**

R+D 2.1.4

Lead: Wärtsilä Schweiz AG

Funding: BFE

Contact: Herrmann Kai

kai.herrmann@wartsila.com

Period: 2009–2012

Abstract: Weiterentwicklung eines neuartigen Versuchsträgers mit optischer Zugänglichkeit, der die Brennkammer eines grossen Zweitakt-Schiffsdieselmotors nachbildet und die Untersuchung innermotorischer Vorgänge unter typischen Bedingungen ermöglicht. Verbessern des Verständnisses von verbrennungsrelevanten Prozessen für die Validierung und weitere Entwicklung von Simulationsmodellen. Anwendung (laser-)optischer Diagnoseverfahren sowie Erprobung von Komponenten zur Unterstützung der Produktentwicklung.

● **DARSTELLUNG DES TECHNOLOGIEPOTENTIALS VON ZUKÜNFTIGEN DIESELMOTOREN ZUR ERFÜLLUNG ZUKÜNFTIGER EMISSIONSVORSCHRIFTEN BEI NIEDRIGEM CO₂-AUSSTOSS**

R+D 2.1.4

Lead: ETHZ – Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)

Funding: BFE

Contact: Boulouchos Konstantinos

boulouchos@lav.mavt.ethz.ch

Period: 2002–2006

Abstract: Untersuchung von Möglichkeiten zur weiteren Reduktion der Schadstoffemissionen bei weiterhin niedrigem Brennstoffverbrauch zukünftiger „Heavy-Duty“ Dieselmotoren. Fokus auf die messtechnische Erfassung der Russ- und NOX-Emission im Brennraum während der Verbrennung. Entwicklung eines schnellen Entnahmeventils und Vorbereitung der nachgeschalteten Messtechnik zur Russpartikelcharakterisierung.

