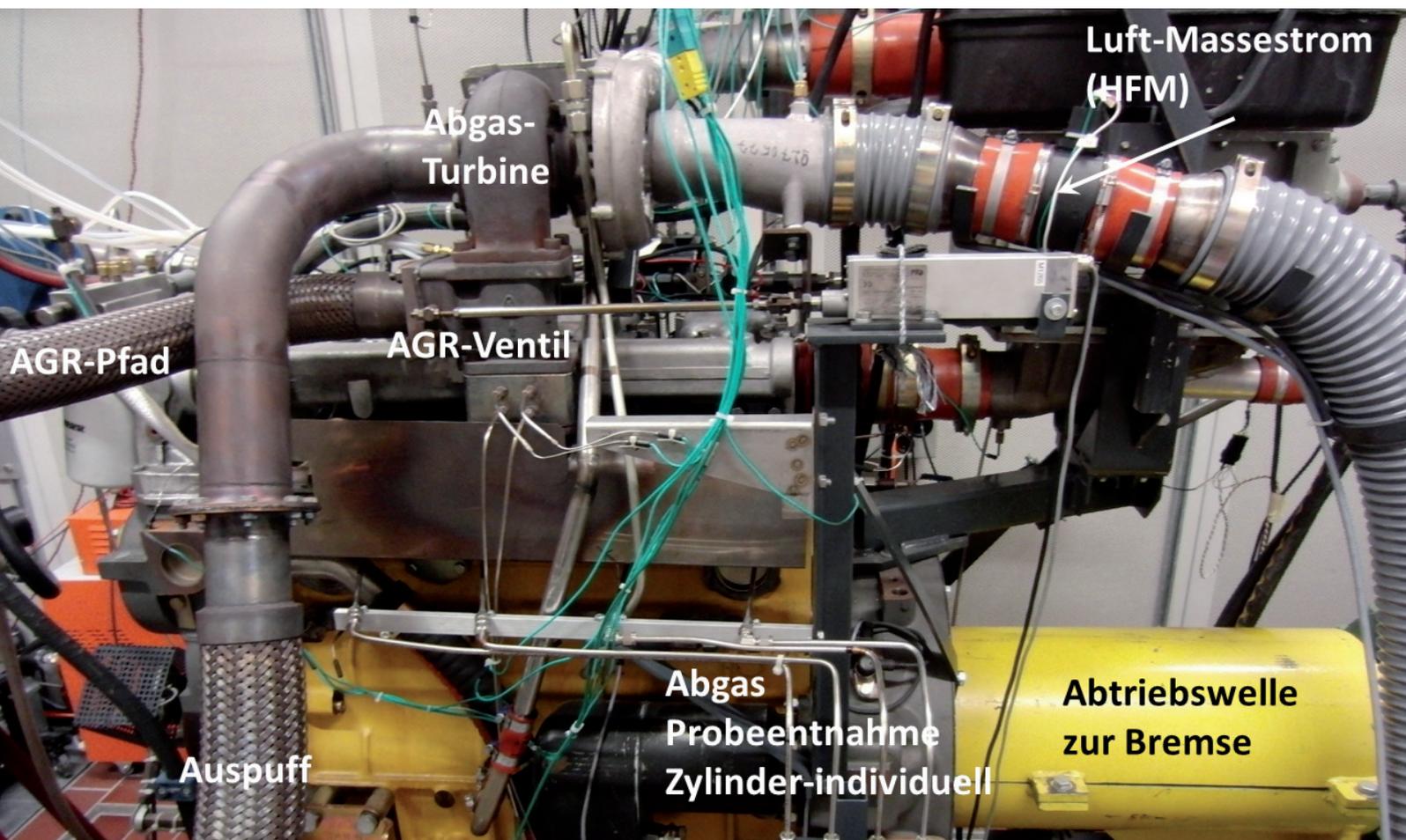


Überblicksbericht 2011

Forschungsprogramm Verbrennung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

Titelbild:**Messeinrichtungen am 4-Zylinder-Dieselmotor mit 6,6 Liter Hubraum**

Für die Entwicklung von schnellen Mess- und Rechenverfahren zur Steuerung der Abgasnachbehandlungssysteme sind genaue Kenntnisse der Rohemissionen (Russ und NO_x) des Motors erforderlich. Es wurde festgestellt, dass die Emissionen pro Zylinder unterschiedlich sind und die Abgasnachbehandlung entsprechend beeinflussen. Neben den Untersuchungen an vereinfachten Versuchsträgern wie Brennkammern oder Einhubtriebwerke sind auch Messungen am konkreten Motor erforderlich. Dafür sind umfangreiche Messeinrichtungen für die zylinderindividuelle Gasentnahme, die Erfassung der Luftzufuhr mittels Heissfilmsensor (HFM), die Rate der Abgasrückführung (AGR) oder die Gesamtemissionen im Auspuff erforderlich.

BFE Forschungsprogramm Verbrennung

Überblicksbericht 2011

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):

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

Bereichsleiter BFE:

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

www.bfe.admin.ch/forschung/verbrennung

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

Einleitung

Die Verbrennung ist ein Oxidationsprozess von Kohlen- oder Wasserstoff, der durch die Zugabe von Sauerstoff und der Abgabe von Wärme und Licht abläuft. Die chemisch mit einer einfachen Formel beschreibbare Reaktion ist in der Praxis hoch komplex, läuft über zahlreiche Zwischenverbindungen ab und ist nicht ideal und vollständig. Hinzu kommen weitere Inhaltsstoffe wie Stickstoff oder Schwefel, die sich am Reaktionsgemisch beteiligen. So werden zusätzliche Produkte gebildet wie NO_x , SO_2 , HC und Partikel. Die numerische Simulation der Abläufe erfordert die Kombination verschiedener Modelle für die Darstellung der kinetischen, thermischen und chemischen Vorgänge. Für die Nutzung der freiwerdenden Energie werden Maschinen wie Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen eingesetzt, die das Temperaturgefälle zur Umgebung nutzen, um Kraft für den Antrieb von Fahrzeugen oder von Generatoren zu erzeugen. Mit den besten Systemen gelingt es heute über 60 % des Energieinhalts des eingesetzten Energieträgers in Strom umzuwandeln. Die restlichen 40 % sind Abwärme mit geringem Temperaturniveau, die allenfalls noch für die Beheizung von Wohnräumen genutzt werden kann.

Das Ziel der Verbrennungsforschung ist, Voraussetzungen zu schaffen, damit der Verbrennungsprozess möglichst ideal abläuft und in Wärmekraftmaschinen in allen Betriebszuständen ein Maximum an Exergie ohne Schadstoffe gewonnen werden kann. Dafür

müssen die thermochemischen Vorgänge im Verbrennungsprozess noch besser verstanden und die Umsetzung in den technischen Systemen optimiert werden.

Die Verbrennung war über Jahrhunderte der wichtigste Energieumwandlungsprozess für die Menschheit und wird auch weiterhin bedeutend bleiben. Die heute vorwiegend eingesetzten fossilen Energieträgern Erdgas, Erdöl und Kohle haben den Nachteil der langfristig begrenzten Verfügbarkeit sowie der Klima schädigenden CO_2 -Emissionen. Auf Biomasse basierende Energieträger sowie aus verschiedenen Stoffen künstlich erzeugte, sogenannte synthetische Brennstoffe werden in der Zukunft an Bedeutung gewinnen. Hintergrund dieser Entwicklung sind die hohe Energiedichte und die gute Speicherfähigkeit der flüssigen Brennstoffe. Diese sind für viele Anwendungen wie die Mobilität über grosse Distanzen (Transportwesen) oder Produktionsmaschinen mit langer Betriebsdauer (Baumaschinen) im Vergleich zu anderen Energieträgern von grossem Vorteil.

Die Schweiz verfügt über international anerkannte Kompetenzen in der Verbrennungsforschung. Dazu gehören Forschungsinstitute im ETH-Bereich und an Fachhochschulen, aber auch von zahlreichen global agierenden Herstellern von Verbrennungsmotoren und Gasturbinen. Dies ist durch die lange Tradition der Schweizer Industrie in diesem Bereich, die seit den Anfängen der Entwicklung der Verbren-

nungskraftmaschinen bahnbrechende Erfindungen hervorgebracht hat, begründet. Auch zahlreiche Entwickler und Hersteller von peripheren Komponenten wie Turbolader, Einspritzsysteme, Katalysatoren, Partikelfilter, Mess- und Steuersysteme sind in der Schweiz aktiv.

Die Ziele der vom Bund mitfinanzierten Verbrennungsforschung sind die Erhöhung des (exergetischen) Wirkungsgrads von Verbrennungssystemen, die Verminderung des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen und damit der CO_2 -Emissionen sowie die Reduktion der Schadstoffe wie Russ, Feinstaub, Stickoxid oder Kohlenwasserstoffe und die Optimierung von Verbrennungssystemen für alternative Energieträger. Die Forschungsziele stimmen auch gut mit den internationalen Bestrebungen überein. Dies wird beispielsweise in den Forschungsschwerpunkten der Arbeitsgruppe, die sich innerhalb der Aktivitäten der Internationalen Energieagentur (IEA) mit der Verbrennung befasst [1], bestätigt. An deren jährlich stattfindenden Task Leader Meeting konnten im Berichtsjahr vier vom BFE mitfinanzierte Projekte vorgestellt werden wobei ein Schweizer Referent für einen Vortrag in der spezial Session «Combustion Diagnostics» eingeladen wurde. Auch in Forschungsprojekten der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [2] sind mehrere Industrieunternehmen und Schweizer Hochschulforscher engagiert.

IEA Klassifikation: 2.1.4 Oil and gas combustion

Schweizer Klassifikation: 1.8 Verbrennung

Programmschwerpunkte

Die Verbrennung ist eine Querschnittstechnologie mit zahlreichen Verbindungen zu anderen Forschungsprogrammen des BFE. Die Zielsetzungen richten sich nach den Vorgaben des Konzepts der Energieforschung des Bundes [3].

Verbesserte Forschungsmethoden und -instrumente: Die Instrumente der Forschung wie physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger sind weiter zu entwickeln und an neue 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 von Kohlendioxid 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 biogenen Brennstoffen.

Schwerpunkte der Periode 2008–2012:

- 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 umfasst.
- Darstellung von «Null-Emission-Systemen» für die kleinskalige (10 kWh bis 100 kWh) kombinierte Strom-Wärme-Kälte-Erzeugung.
- Optimierung von Gemischaufbereitung, 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 und Auftritt der Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung und -industrie inkl. Leistungserbringern von Komponenten.

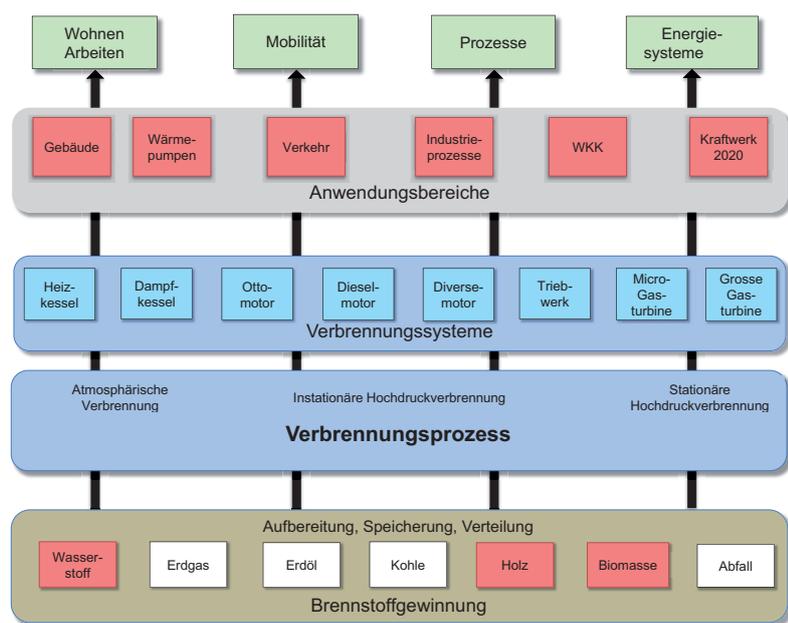
Rückblick und Bewertung 2011

Die im letztjährigen Ausblick vorgesehenen Vorhaben konnten umgesetzt werden. Dazu gehörte die Tagung «Verbrennungsforschung in der Schweiz», die rund 100 in der Schweiz in der Verbrennungsforschung engagierte Personen zusammenbrachte. Die Referate [4] zeigten die Herausforderungen für die Forschung und Ergebnisse aus der Industrie. Mit dem neuen Projekt *Molecular data of combustion relevant radicals* konnte die Erforschung der Reaktionsmechanismen im Zündprozess fortgesetzt werden. Dank der Unterstützung durch die Industrie konnte am LAV ETHZ [5] ein Projekt zur Entwicklung kleinskaliger Verbrennungsmotoren für den Einsatz in WKK-Anlagen gestartet werden. Das abgeschlossene Projekt *BioExDi* liefert umfangreiches Datenmaterial über die Auswirkungen von Biodiesel auf die Abgasnachbehandlung. Die Ergebnisse dienen Herstellern von Katalysatoren und Dieselpartikelfilter zur Weiterentwicklung ihrer Produkte. Im Projekt *Vorverdampfertechnik für Öl-brenner* wurden die Vorgaben für eine rückstandsfreie Verbrennung von biogenen Brennstoffen in einem Brenner mit Vorverdampfung eruiert.

Ausblick

Von Interesse ist, ob im Projekt *Kleinskalige WKK-Anlagen* ein Wirkungsgrad von 35 % bei minimalen Emissionen erreicht wird. Vorgesehen ist der Abschluss von 4 grösseren Projekten, deren Zielerreichung auf gutem Wege ist. Das IEA Implementing Agreement Combustion [1] wurde verlängert und startet 2012 eine weitere 4-Jahresperiode.

Neue Projekte sollen die Grundlagen der numerischen Simulation für neuartige Brennverfahren und Brennstoffe verbessern, die Entwicklung von Versuchsträgern für grosse Dieselmotoren erweitern sowie die Zusammenarbeit mit der Industrie weiterentwickeln. Die Kontakte zwischen den Schweizer Verbrennungsforschern – wie diese durch die Verbrennungstagung manifest wurden – sollen gepflegt, verstärkt und ausgebaut werden.



Querschnittstechnologie Verbrennung: Vernetzung mit Forschungsprogrammen des BFE (rot) und den Schwerpunkten des Forschungskonzepts des Bundes (grün).

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Die Forschungsausgaben der Schweizer Industrie zur Verbesserung von Verbrennungssystemen belaufen sich auf rund 150 Mio. CHF. Die Arbeiten erfolgen vorwiegend im Wettbewerb und haben das Ziel, die Verbrennungssysteme an künftige Emissionsvorschriften anzupassen und deren Effizienz zu verbessern. Ein Beispiel ist die Euro VI Norm [6], die ab 2013/14 bei schweren Motorfahrzeugen den Grenzwert für Stickoxidemissionen gegenüber 2008/09 um den Faktor 5 tiefer vorschreibt. Um diesen Wert zu erreichen, werden unterschiedliche Vorgehen gewählt. Bei kleineren Motoren wählt die Industrie vermehrt den Weg über die Abgasnachbehandlung mit Katalysator und Partikelfilter. Bei grossen Systemen werden innermotorische Massnahmen wie z. B. die Abgasrückführung zur Emissionsminderung weiter entwickelt.

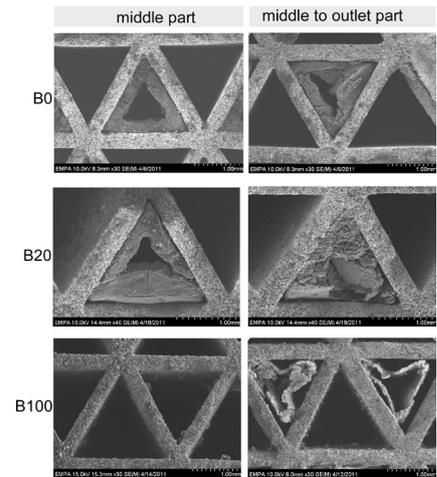
Mit der Förderung durch das BFE können Projekte angegangen werden, die auch grundlegende oder neuartige Aspekte der Verbrennungsforschung betreffen. Dazu gehören die Untersuchung der Energiefreigabe der Moleküle im Zündprozess, die Entwicklung von numerischen Simulationsmodellen für biogene Brennstoffe und von Versuchsständen für deren 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. Dies, weil beispielsweise die Verbesserung des Wirkungsgrads und die Reduktion der Schadstoffe gegenläufige Bestrebungen sind.

Positive und negative Einflüsse von biogenen Brennstoffen

Ersatzbrennstoffe für fossile Energieträger werden auch für motorische Anwendungen in unterschiedlicher Ausprägung untersucht. Noch in den Anfängen steckt die Entwicklung von synthetischen Brennstoffen, die neben der Gewinnung aus Abfällen auch Varianten mit der solarchemischen Herstellung von Benzin [7] untersucht. Vielerorts bereits im Einsatz sind Biogas, das direkt in Motoren verbrannt wird oder Ethanol, das in zahlreichen Ländern dem Benzin beigemischt wird. Weniger verbreitet ist die Nutzung von Bio-

diesel, der dem konventionellen Diesel beigemischt oder auch direkt genutzt werden kann. Durch den höheren Anteil an Zusatzstoffen sowie sauerstoffhaltigen Verbindungen hat er einen Einfluss auf die Verbrennung im Motor sowie auf die Abgasnachbehandlungssysteme. Probleme entstehen durch die teilweise unterschiedliche Zusammensetzung und die Alterung des Biodiesels.

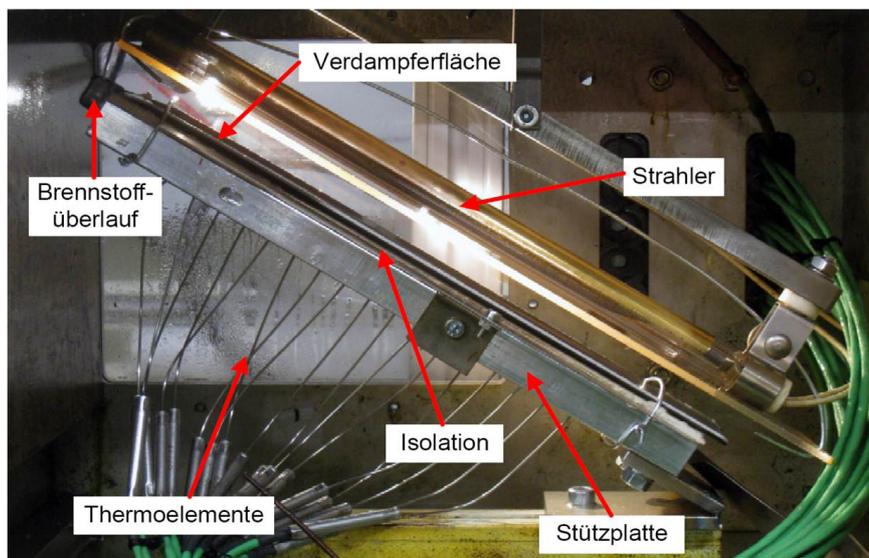
Die Auswirkungen von Brennstoffmischungen aus Diesel und FAME (Fatty Acid Methyl Ester) auf den Betrieb von Abgasreinigungssystemen mit Katalysator (SCR) und Dieselpartikelfilter (DPF) wurde im nun abgeschlossenen Projekt BioExDi untersucht. Abgeklärt wurde der Einfluss der Biokomponenten auf die Wirkung des SCR und des DPF sowie auf die Regenerationsvorgänge und die Ablagerungen im DPF. Das Projekt wurde unter der Leitung des AFHB [8] zusammen mit der Empa [9] und Industriepartnern bearbeitet. Es wurden zahlreiche Versuche mit verschiedenen Anteilen an FAME (B0, B7, B20, B100) durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass der Zündverzug durch die reaktiveren Bestandteile des Biodiesels leicht verkürzt wird und mit zunehmendem Anteil an FAME die Wärmeabgabe und dadurch das Stickoxid etwas höher sind als bei reinem Diesel. Die CO- und HC-Emissionen werden reduziert und die Partikel-Emissionen werden bei hoher Last vermindert und bei geringer Last angehoben. Mit einer Abgasrückführung (AGR) von 10–20 % kann die durch B100 verursachte Zunahme von NO_x in gleichem Umfang reduziert werden. Mit AGR wird aber auch eine deutliche Zunahme der Nanopartikel-Emission festgestellt. Die Reduktion der NO_x-Bildung durch die Verzögerung des Einspritzzeitpunkts hat eine Erhöhung des Brennstoffverbrauchs zur Folge. Die Wirkung des DPF und des SCR sind weitgehend ähnlich und erfüllen die Reduktionsziele. Die Zugabe von Harnstoff im nachgeschalteten SCR verursacht die Bildung von Nanopartikeln was bei höheren NO_x-Emissionen eine Zunahme bewirkt. Reiner Biodiesel (B100) bewirkt eine Verminderung des Filtereffekts im DPF. Dies ist auf nachträgliche Kondensationseffekte und ein Durchschlüpfen von kleinsten Partikeln zurückzuführen.



Figur 1: Bilder des Dieselpartikelfilters mit unterschiedlicher Beimischung von Biodiesel. Im Einlasskanal sind bei B0 und B20 Ablagerungen sichtbar, bei B100 keine. B100 verursacht jedoch auf der Auslass-Seite eine ca. 60 µm dicke graue Schicht.

ren. Mit zunehmendem FAME-Anteil im Brennstoff wird die Dauer, bis der katalytisch beschichtete DPF wegen zu hohem Gegendruck regeneriert werden muss, verlängert. Dies ist auf die geringeren PM-Emissionen (particulate matter) sowie die höhere Reaktivität der Biokomponenten zurückzuführen. Die Regeneration beginnt bei tieferen Temperaturen und ist intensiver. Bei Filtern mit aktiver Regeneration (Brenner) sind keine wesentlichen Unterschiede im Regenerationsprozess zu erkennen. Gegenüber den geringeren Russablagerungen wurde jedoch eine starke Zunahme der Aschemenge bei höherem Biodieselanteil festgestellt (Figur 1). Bei allen Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass die Qualität von Biodiesel sehr unterschiedlich ist und Additive, welche zur Verbesserung der Eigenschaften (Kälte- und Wärmeverhalten, Alterung) beigefügt werden, Probleme im Abgas verursachen können.

Die ausschliessliche Verwendung von hochwertigen Energieträgern wie Erdgas, Erdöl oder auch Biogas oder Biodiesel für die Erzeugung von Wärme zur Beheizung von Gebäuden entspricht nicht den Zielen des BFE für die zukünftige Energienutzung. Weil nicht alle bestehenden Gebäude auf den Betrieb mit Wärmepumpen umgerüstet werden können und kleine Wärmekraftkopplungsanlagen noch



Figur 2: Prüfstand für die Untersuchung der Verdampfung eines Brennstofffilms nach dem CatVap-Verfahren. Im realen System reagiert ein Teilstrom des verdampften Brennstoffs mit einer katalytisch wirkenden Oberfläche und erzeugt die Strahlungswärme zur Beheizung der Fläche. Für die Versuche wurde ein elektrisch beheizter Strahler eingesetzt.

kaum verfügbar sind, werden jedoch noch über eine längere Zeit Heizkessel im Einsatz sein. Dazu gehören auch Anlagen mit geringer Leistung, die kostengünstig als additive oder bivalente Systeme zur solarthermischen Wärmeerzeugung oder zu (Luft-)Wärmepumpen eingesetzt werden können. Die untere Leistungsgrenze von Ölheizkesseln liegt bei 10 kWh. Um bei kleineren Leistungen betrieben werden zu können, müssen die Anlagen laufend ein-/ausgeschaltet werden. Dies verringert den Wirkungsgrad.

Anstelle einer Düse, die den Brennstoff versprüht, muss dieser für kleinere Leistungen vor der Verbrennung verdampft werden. Interessant ist es, wenn solche Systeme mit biogenen Brennstoffen CO₂-neutral betrieben werden können. Das BFE unterstützte deshalb das 2011 abgeschlossene Projekt *Vorverdampfertechnik für Ölbrenner* an der FHNW [10]. Dabei wurden zwei verschiedene Verdampfungssysteme (CatVap und ThermMix) für die Verwendung von Biodiesel (bestehend hauptsächlich aus FAME) untersucht.



Figur 3: 1 Zylinder Motor von Wenko. Montage auf dem Prüfstand mit einer Wirbelstrombremse im Labor des LAV an der ETH in Zürich.

Der Unterschied der beiden Verfahren liegt in der Quelle und Regelbarkeit der Verdampfungswärme und in der Art, wie der Brennstoff auf die Verdampferfläche aufgebracht wird.

Im ThermMix-System wird der Brennstoff mit einem Rotationszerstäuber verteilt und auf einer mit Rauchgasrückführung beheizten Wand verdampft. Im Prüfstand konnte gezeigt werden, dass die Rückstandsbildung stark von der Art der Oberflächenbenetzung und somit von der Temperatur der Wand abhängt. In einem Temperaturbereich unterhalb der Leidenfrosttemperatur (430–440 °C) findet Blasen-Übergangssieden statt, so dass der flüssige Tropfen die Oberfläche ganz oder partiell benetzt. Die Rückstandsbildung ist dabei vorwiegend von der Flächenbelastung abhängig. Oberhalb der Leidenfrosttemperatur findet keine Benetzung mehr statt, der Tropfen prallt auf die Oberfläche, um je nach Weberzahl wieder von ihr abzuprallen oder unter Sekundärtropfenbildung zu zerfallen. Hier findet keine Rückstandsbildung mehr statt, und die Verdampfung erfolgt in der heissen Luft. Kleinere Tropfen verdampfen dabei schneller und lassen so eine höhere Flächenbelastung zu. Um der Bildung von Rückständen vorzubeugen, muss bei höherer Leistung die Tropfengrösse verringert und der FAME-Anteil reduziert werden.

Die Erkenntnisse aus den Prüfstandsversuchen wurden im realen System getestet und es konnte eine rückstandsfreie Verdampfung erreicht werden. Aus den Tropfenverdampfungsversuchen konnte ein einfaches Rechenmodell erstellt werden, das eine Voraussage der Rückstandsbildung bei sich ändernden Leistungen und/oder Auslegungen erlaubt.

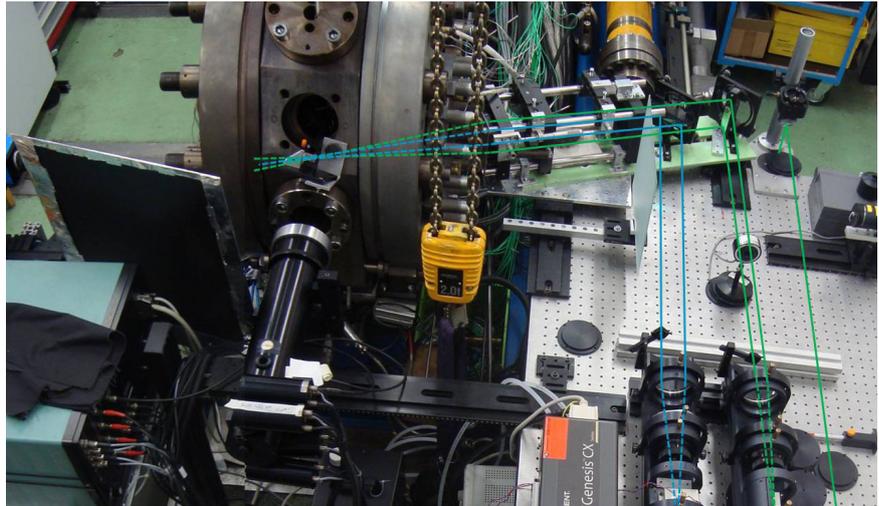
Das Vorverdampfersystem CatVap basiert auf der Verdampfung eines Brennstofffilms mittels Strahlung. Dabei soll die Verdampferflächen-Temperatur unterhalb der Siedetemperatur bleiben. Dies soll unerwünschten Ablagerungen auf der Verdampferfläche vorbeugen. In einem speziell für die Filmverdampfung erstellten Prüfstand wurde der Einfluss der Strahlerleistung, der Brennstoffzusammensetzung und der Verdampferflächen-Beschaffenheit auf die Rückstandsbildung un-

tersucht (Figur 2). Es konnte kein Zustand gefunden werden, bei dem der Film austrocknete (gesamter Brennstoff verdampft) und gleichzeitig keine Rückstände auftraten. Nur wenn mehr Brennstoff gefördert wird, als verdampft werden kann, findet keine Rückstandsbildung aber auch keine Austrocknung statt. Im realen System würde das zur diffusionsartigen Verbrennung von Tropfen und damit verbundenen erhöhten Emissionen führen. Stofftransportberechnungen haben gezeigt, dass im CatVap-Grunddesign die Brennstoffdiffusion nicht ausreicht, um genügend Brennstoff an den Katalysator zu transportieren. Der notwendige Stofftransport funktioniert nur durch Verwirbelungen der Luft, bedingt durch die geometrische Anordnung des Lufteintritts.

Kleine und grosse Motoren aus der Schweiz

In der Schweiz sind mehrere international tätige Motorenhersteller aktiv. So fabriziert der weltweit tätige Baumaschinenhersteller Liebherr seine Motoren seit 1984 in der Schweiz und Fiat Power Train (Iveco) betreibt in Arbon sein Entwicklungszentrum für Dieselmotoren mit 30 Prüfständen. In Winterthur entwickelt Wärtsilä Schweiz AG Schiffsdieselmotoren mit einem Hubraum von 25'000 Litern und einer Leistung von 80'000 kWh, die weltweit zu den grössten zählen. Interessant ist jedoch auch die Firma Wenko [11] aus Burgdorf, die ihre kleinen Motoren – bisher für den Einsatz in Freizeitfahrzeugen hergestellt – für die Nutzung als Rangeextender in Elektrofahrzeugen weiterentwickelt. Ein solcher 1 Zylindermotor mit 0,325 Litern Hubraum (Figur 3) wird im Projekt *Klein-WKK-Anlage* am LAV ETHZ für den stationären Einsatz und die Nutzung von Biogas als Brennstoff eingesetzt. Die Herausforderung ist, ein kostengünstiges Energieumwandlungssystem mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 35 % und einem Gesamtwirkungsgrad (inkl. Wärmenutzung) von 90 % bei minimalen Stickoxiden (kleiner 50 mg/Nm³) zu erreichen.

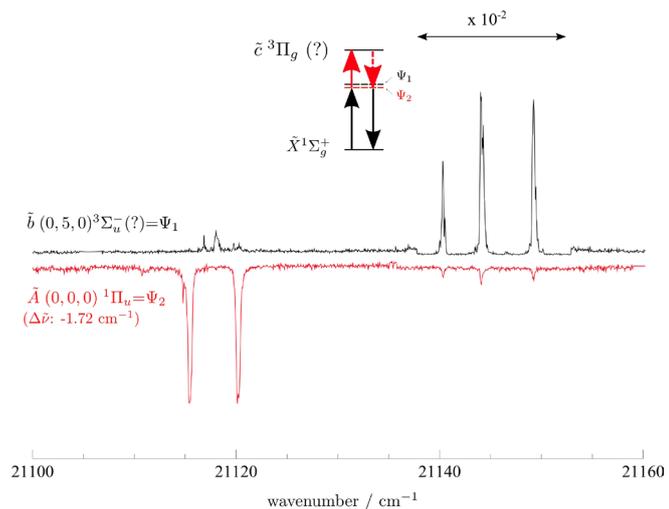
Untersuchungen an grossen 2-Takt-Schiffsdieselmotoren erfolgen im Projekt *Weiterentwicklung einer Spray*



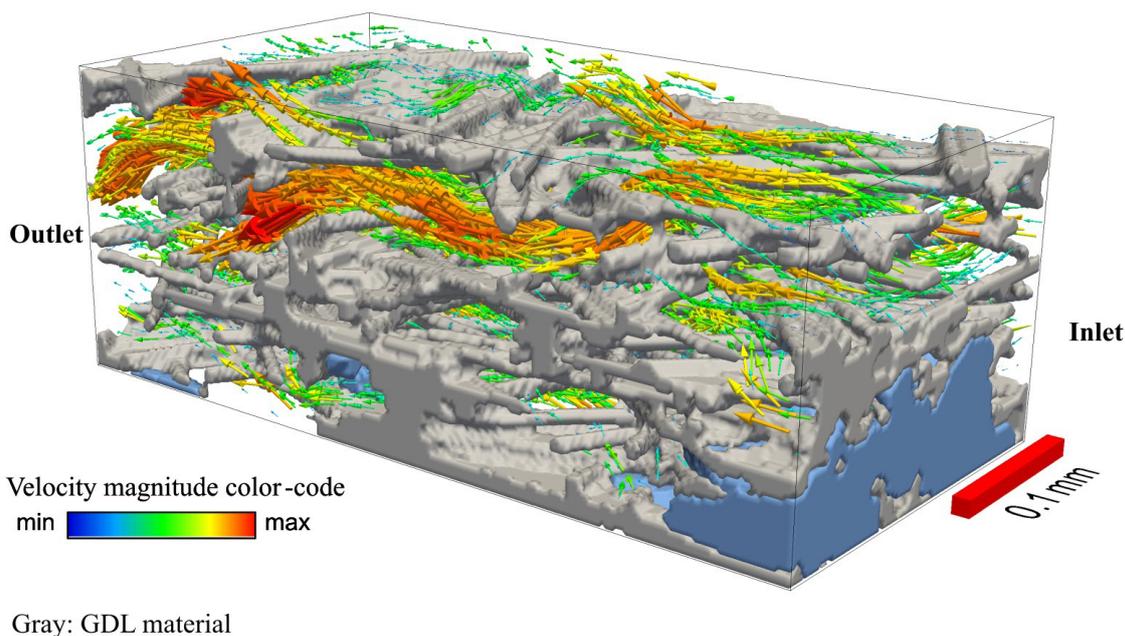
Figur 4: Aufbau der Phasen Doppler Anemometrie zur Messung der Tropfengrösse und -geschwindigkeit in der Spray Combustion Chamber bei Wärtsilä (Schweiz) AG in Winterthur.

Combustion Chamber von Grossdieselmotoren von Wärtsilä [12]. Dafür wurde ein Versuchsträger, der den Brennraum eines Zylinders mit einer Bohrung von 500 mm repräsentiert, entwickelt. Projektinhalte sind das Zündverhalten verschiedener Brennstoffe (von Schweröl bis handelsüblichem Dieselkraftstoff), die Erweiterung der Anlage durch neuartige Komponenten wie Probenahmesonde und Schaugläser, die Verbesserung der Einspritzdüsen und die Weiterentwick-

lung der optischen Messtechniken. Für die Einspritzung von Schweröl wurde eine komplett neue Einspritzanlage aufgebaut. Unter der Variation der Gasdichte wurden mit Hilfe von Schattenbildern die räumliche Ausbreitung, die Eindringtiefe und der Winkel des Sprays vermessen. Die Messtechnik wurde erweitert, um mit schmalbandigem UV-Filter das Zündverhalten zu erfassen. Um die Messresultate nicht zu verfälschen, muss bei der Schwerölverbrennung das Inkandeszenzsignal des



Figur 5: Mit TC-FWM-Spektroskopie können Übergänge aus dem Grundzustand von C₂ in einen Triplet Zustand über 2 Zustände Ψ₁ und Ψ₂ vermessen werden. Diese sind Überlagerungen von energetisch nahen Singlet- und Triplet-Zuständen mit unterschiedlichem Singlet-Anteil. Dementsprechend erscheinen, je nach Anregungskonzept, einige Übergänge mit grösserer Intensität als andere. Eine genaue Evaluation aller gemessener Intensitäten erlaubt den Grad der Triplet-Singlet-Mischung zu bestimmen. Daraus kann auf die Energie der nicht direkt anregbaren Triplet-Zustände geschlossen werden.



Figur 6: Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten eines reaktiven Gases durch eine Gasdiffusionschicht.

Russes mitbestimmt werden. Mit der Phasen-Doppler-Anemometrie konnte die Tropfengrösse und -geschwindigkeit im Spray vermessen werden. Trotz der langen Wege bei dieser Motorengrösse und der dicken Saphirgläser konnten sinnvolle Resultate erzielt werden (Figur 4). Das Projekt ist eingebettet ins EU-Projekt *HERCULES* [13], in dem neue Technologien für die Reduktion der Schadstoffemissionen und die Erhöhung des Wirkungsgrads grosser Schiffsdieselmotoren entwickelt werden. 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 der Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für deren Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden.

Reaktionen und Strömungen im Mikrobereich

Die Reaktionsmechanismen der Verbrennung finden im Mikrobereich statt. Dazu gehören die Strömung, die Verwirbelung und die Durchmischung der Moleküle vor der Zündung und die Energiefreigabe im Zündprozess. Der Zündvorgang hat einen grundlegenden Einfluss auf den Verlauf der

Verbrennung und damit auf die Entwicklung von Schadstoffen, insbesondere von Russ. Das Zündverhalten wird weitgehend durch Peroxy-Radikale bestimmt. Sie beeinflussen die Art und die Zusammensetzung der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung der nachfolgenden Reaktionen.

Die thermochemischen Daten von Radikalen erreichen bisher eine zu geringe «chemische» Genauigkeit. Diese schlägt sich in der Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeit nieder, die innerhalb eines Faktors 10 liegen kann. Damit ist beispielsweise die Entstehung von Stickoxid kaum verlässlich modellierbar. Zur genauen Bestimmung der energetischen und molekularen Zustände (Spinrotationen) der Radikale werden im Projekt *Molecular Data of Combustion relevant Radicals* am PSI [14] spektroskopische Methoden eingesetzt. Diese müssen empfindlich genug sein, um im Nanosekunden-Bereich die Radikale zu detektieren. Mit der Femtosecond-Two-Colour-Four-Wave-Mixing-Technique ist es nun gelungen, die verschiedenen Varianten und Kombinationen der Spinrotationen des C_2 -Radikals zu bestimmen. Dabei wurden auch die energiereichen Dunkelzustände aufgedeckt (Figur 5). Diese liegen in einem chemisch relevanten Energiebereich und müssen

genau bekannt sein, weil sie eine entscheidende Rolle auf die Reaktionsgeschwindigkeit haben. So stört C_2 die Messungen nach der CARS-Methode, was jedoch von vielen Forschern nicht berücksichtigt wird. Die C_2 -Bildung hat einen starken Einfluss auf die Russentstehung und sollte deshalb möglichst genau bekannt sein.

Im Projekt *Modelling of Energy conversion at microscale* wird ein neues numerisches Berechnungsmodell auf der Basis der Lattice-Boltzmann-Methode entwickelt. Dieses soll chemisch reaktive Strömungen mit verschiedenen Moleküllarten bei nicht isothermen Bedingungen in komplexen Geometrien im Microbereich darstellen können. Die Thematik ist für künftige Verbrennungssysteme (mit katalytischen Reaktoren) und für Brennstoffzellen relevant und wird deshalb von den zwei BFE Forschungsprogrammen «Brennstoffzellen» und «Verbrennung» unterstützt. In Figur 6 wird die Visualisierung der Strömungsgeschwindigkeit eines Gases in einem komplexen Körper gezeigt. Die Berechnungen werden mit Stockes-Berechnungen und Röntgenstrahl-Tomographie validiert und erreichen eine sehr gute Übereinstimmung.

Nationale Zusammenarbeit

Die Forscherteams der Schweizer Verbrennungsforschung pflegen über zahlreiche gemeinsame Projekte gute Kontakte und dies auch zwischen Hochschulen und Industrie. Dies gilt auch für die vom BFE mit finanzierten Arbeiten. 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 auch im Projekt *Schnelle Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselmotoren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung* direkt oder indirekt involviert. Dazu gehören Kistler Instrumente AG, Iveco Motorenforschung AG, Liebherr Machines Bulle SA und Hug Engineering AG. Das Projekt *CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* ist Teil des vom CCEM geführten Projekts Clean Efficient Large Diesel Engine (CELaDE) [15] in dem eine Zusammenarbeit zwischen der ETHZ, dem PSI und der Empa erfolgt. Im Projekt *Klein-WKK-Anlage* arbeiten das LAV ETHZ, Wenko AG und Bucher AG Motorex zusammen. Das Projekt BioExDi wurde unter der Leitung der AFHB mit der Empa bearbeitet und von Hug-Engineering, Huss Umwelttechnik GmbH (Deutschland) und Dinex Group (Dänemark) unterstützt. Es wurde vom BFE-Forschungsprogramm Biomasse, dem Bundesamt für Umwelt und von der Erdölvereinigung mitfinanziert. 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 ebenfalls von der Erdölvereinigung mitfinanziert.

Jährlich wird an der ETHZ die *Conference on Combustion Generated Nanoparticles* [16] 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 Wirkungaspekten. Die vom LAV ETHZ mit TTM A. Mayer organisierte Veranstaltung findet national und international bei technisch wie auch medizinisch orientierten Fachleuten grosses Interesse.

An der alle zwei Jahre stattfindenden Tagung Verbrennungsforschung in der Schweiz trafen sich im Oktober 2011 rund 100 Forscher und Entwickler aus den Bereichen Hochschulen und Industrie. Der vom BFE, LAV ETHZ und PSI organisierte Anlass ist eine Plattform mit Informationsaustausch über aktuelle Themen der Verbrennungsforschung in der Schweiz und auch zwischen jungen Forschern und Verantwortlichen aus der Industrie.

Internationale Zusammenarbeit

In mehreren vom BFE unterstützten Projekten erfolgt eine internationale Zusammenarbeit mit Hochschulen und Industriepartnern. Dazu gehört das von der EU im Rahmen des Forschungsprogramms FP7 mit finanzierte Projekt HERCULES: 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 *Klein-WKK-Anlage* enthält ein Arbeitspaket *AGR bei Gasmotoren mit extremen Steuerzeiten*, das im Auftrag der FVV erfolgt und zusammen mit dem LVK der TU München bearbeitet wird. Auch das Projekt *CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* wird parallel zu Projekten der FVV bearbeitet, mit entsprechender Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen in Deutschland. Im Projekt *Molecular data of combustion relevant radicals* bestehen gute Kontakte zu Forschergruppen an der ETHZ, an den Universitäten Basel und Bern. Ein Austausch findet zudem mit den Universitäten Würzburg (D), Birmingham (GB), Iceland (IS) und der University Of The Pacific (US) statt, die ebenfalls an der VUV Beamline des SLS arbei-

ten. Mit der Universität Konstanz werden gemeinsam Messungen durchgeführt. Das Projekt ist in der COST Action 901 [18] der EU in der sich Gruppen aus mehr als 20 Ländern austauschen, aufgenommen. Im NCCRMUST [18] wird in Zusammenarbeit mit der Universität Zürich an den ultraschnellen Messtechniken gearbeitet.

Ein wichtiger Informationsaustausch und die Gelegenheit, die Schwerpunkte der Verbrennungsforschung international mitzugestalten, erfolgt in der Mitarbeit in Arbeitsgruppen der Internationalen Energieagentur (IEA). Für die Verbrennung relevant sind das Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion (IEA Combustion) [1], die Working Party for Fossil Fuels (WPFF) [19] und das Implementing Agreement Advanced Motor Fuels [20]. 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 Emissionen aufweisen, voranzutreiben. Die Forschungsthemen werden in sogenannten Collaborative Tasks bearbeitet. Dazu ge-

hören 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. Das IEA AMF will die internationale Forschungsnetzwerke bei der Erforschung und Entwicklung, bei der Implementierung und Verbreitung von sauberen, energieeffizienten und nachhaltigen Treibstoffen und den damit zusammenhängenden Fahrzeugtechnologien fördern. Die Schweiz hat 2010 den Annex Toxicity of Exhaust Gases and Particles from IC Engines – International Activities Survey (EngToxIn) initiiert und die Leitung übernommen.

Bei den Implementing Agreements *Greenhouse Gas R&D Programme*, *Enhanced Oil Recovery* und *IEA Clean Coal Centre* (IEA WPPF) sind die Verbesserung des Wirkungsgrads von grossen mit fossilen Brennstoffen befeuerten Kraftwerken und in diesem Kontext Verfahren zur Elimination des CO₂ wichtige Themen. In neueren Überlegungen fliessen auch Aspekte der Nutzung von CO₂ 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 Symposium on Marine Engineering (ISME) in Japan, die FVV-Tagungen, 24rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS) in Estoril, 8th ICMMES conference, Lyon, France, 13th International Conference on Numerical Combustion, Greece, 64th Annual meeting of the American Physical Society, division of fluid dynamics, Baltimore, USA, Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics, North Dakota, USA. Zudem wurden diverse Berichte beispielsweise als SAE-Paper publiziert.

Referenzen

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

[2] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (www.fvw-net.eu/)

[3] Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011

[4] BFE, LAV, PSI, Tagung «Verbrennungsforschung in der Schweiz 2011» (www.bfe.admin.ch/forschungverbrennung)

[5] LAV ETHZ, Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (www.lav.ethz.ch)

[6] EU Emission Standards for HD Diesel Engines: VERORDNUNG (EG) Nr. 595/2009

[7] A. Steinfeld et al: «Syngas production by simultaneous splitting of H₂O and CO₂ via ceria redox reactions in a high-temperature solar reactor», Institut für Energietechnik ETHZ, 2011

[8] Berner Fachhochschule Technik und Informatik, Abgasprüfstelle (AFHB), Nidau (labs.hti.bfh.ch)

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

[10] FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für

Thermo- und Fluid-Engineering (ITFE) (www.fhnw.ch/technik/itfe)

[11] Wenko AG Swissauto, Burgdorf (www.swissauto.com/)

[12] Wärtsilä (Schweiz) AG, Winterthur (www.wartsila.com)

[12] High-efficiency Engine R&D on Combustion with Ultra-low Emissions for Ships, EU-FP7 (http://cordis.europa.eu/projects/rcn/89926_en.html)

[14] Paul Scherrer Institut (www.psi.ch)

[15] Competence Center Energy and Mobility (CCEM) Project Clean Efficient Large Diesel Engine (www.ccem.ch)

[16] Conference on Combustion Generated Nanoparticles (www.nanoparticles.ethz.ch)

[17] COST European Cooperation in Science and Technology Action CM 901 Detailed Chemical Kinetic Models for Cleaner Combustion (www.ensic.inpl-nancy.fr/cost/)

[18] NCCR-MUST, National Centre of Competence in Research (www.nccr-must.ch/home.html)

[19] IEA Working Party on Fossil Fuels (www.iea.org)

[20] IEA Implementing Agreement on Advanced Motor Fuels (www.iea-amf.vtt.fi/)

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- GRUNDLAGEN ZUR ERWEITERUNG DES LEISTUNGSBEREICHS UN DER BRENNSTOFF-FLEXIBILITÄT VON ÖLBRENNERN MIT VORVERDAMPFERTECHNIK (VVT)** R+D 2.1.4*

Lead: FHNW	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.
- ERWEITERUNG UND VALIDIERUNG DER CRFD-SIMULATION FÜR NEUE MOTORISCHE BRENNVERFAHREN UND KRAFTSTOFFE** R+D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period: 2008–2012

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.
- ERWEITERUNG UND VALIDIERUNG DER CRFD-SIMULATION FÜR NEUE MOTORISCHE BRENNVERFAHREN UND KRAFTSTOFFE** R+D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period: 2008–2012

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 ENERGIEEFFIZIENTE DIESELBRENNVERFAHREN AN DER NAHTSTELLE ZUR ABGASNACHBEHANDLUNG** R+D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period: 2008–2012

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).
- INFLUENCES OF BIOCOMPONENTS (FAME) ON EMISSIONS AND ON EXHAUST SYSTEMS OF HD-DIESEL ENGINES (BIOEXDI)** R+D 2.1.4

Lead: BFH TI - AFHB	Funding: BFE
Contact: Czerwinski Jan Jan.Czerwinski@bfh.ch	Period: 2009–2011

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.
- 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.
- MODELING OF ENERGY CONVERSION PROCESSES AT THE MICROSCALE** R+D 2.1.4

Lead: PSI-Combustion	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.

● **AUSLEGUNG UND REALISIERUNG VON WKK-ANLAGEN MIT „NULL“-SCHADSTOFF-POTENTIAL UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG BIOGENER ENERGIETRÄGER**

R+D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV

Funding: BFE

Contact: Boulouchos Konstantinos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch

Period: 2011–2013

Abstract: Klein-WKK-Anlage (≤ 10 kW_{thel.}) mit el. Wirkungsgrad 35 % und „Null“-Schadstoff-Potential mit Erdgas. Erweiterung auf Biogase geplant. Für die optimale Auslegung des 1 Zylindermotors werden reaktionskinetische und strömungstechnische Grundlagen, insbesondere für den Einsatz gekühlter Abgasrückführung, erarbeitet. Nutzung dieser Grundlagen für Gasmotoren auch im Rahmen eines Projekts mit der FVV.

● **MOLECULAR DATA OF COMBUSTION RELEVANT RADICALS**

R+D 2.1.4

Lead: PSI-Combustion

Funding: BFE

Contact: Thomas Gerber thomas.gerber@psi.ch

Period: 2011–2014

Abstract: Der Zündvorgang hat einen grundlegenden Einfluss auf den Verlauf der Verbrennung und damit die Entwicklung von Schadstoffen, insbesondere von Russ. Die thermochemischen Daten der Radikale im Zündprozess sollen mit spektroskopischen Messungen im ns - μ s-Bereich genauer als bisher bestimmt werden. Problematisch ist die Erzeugung der Radikale. Zusammenarbeit mit EU-COST-Action 901 und NCCR-MUST.

