



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

# **ENERGIEFORSCHUNGSPROGRAMM VERBRENNUNG FÜR DIE JAHRE 2008-2011**

## **Impressum**

Datum: 14. September 2009

Autor: Stephan Renz, Beratung Renz Consulting, Elisabethenstr. 44, 4010 Basel

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, CH-3003 Bern, Tel. 031 322 56 11,  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Bezugsort der Publikation: [www.bfe.admin.ch/forschungverbrennung/index.html?lang=de](http://www.bfe.admin.ch/forschungverbrennung/index.html?lang=de)

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	4
1. Einleitung .....	5
2. Systemdarstellung und –abgrenzung der Verbrennungsforschung .....	6
3. Verbrennungsforschung - Ausgangslage .....	11
4. Nationale Akteure .....	15
5. Internationale Zusammenarbeit .....	23
6. Technische und wirtschaftliche Zielsetzungen .....	24
7. Mitteleinsatz für die Verbrennungs-Forschung .....	26
8. Forschungsschwerpunkte in den Jahren 2008 – 2011 .....	27
Schwerpunkt 1: .....	27
Schwerpunkt 2: .....	27
Schwerpunkt 3: .....	28
Schwerpunkt 4 .....	29
Schwerpunkt 5: .....	29
Schwerpunkt 6 .....	30
Referenzen .....	31

## Zusammenfassung

Die Verbrennung ist nach wie vor der wichtigste Prozess zur Umwandlung verschiedener Energieträger in die nutzbaren Energieformen Kraft (Strom) und Wärme. Die über die Verbrennung genutzten Energieträger bilden sowohl in der Schweiz (75%) auch weltweit (85%) den weitaus grössten Anteil am Gesamtenergieverbrauch. Dafür werden vorwiegend die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas und Kohle eingesetzt. Der Anteil der erneuerbaren Energieträger wie Holz, Biogas oder Biodiesel ist zunehmend. Hinzu kommt die Verbrennung von Abfällen.

Durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern wird jedoch auch ein wertvoller und endlicher Rohstoff verzehrt. Nachteilig sind zudem der CO<sub>2</sub>-Ausstoss sowie die Emission verschiedener für Menschen und Natur schädlicher Stoffe (z.B. Feinstaub, NO<sub>x</sub>, CO). Die Verbesserung der Effizienz und die Reduktion der Schadstoffemissionen von Verbrennungssystemen haben deshalb hohe Priorität.

Die Schweizer Verbrennungsforschung ist international anerkannt und hat eine langjährige Tradition. Entwicklungszentren weltweit tätiger Unternehmen sind in der Schweiz domiziliert aber auch Motorenhersteller und zahlreiche Zulieferer der Verbrennungsindustrie tragen zu einem Umsatz von rund CHF 2 Mrd. bei. Der Bund setzt für die Verbrennungsforschung jährlich rund CHF 11 Mio. ein. Um im weltweiten Forschungsumfeld einen Beitrag leisten zu können, sind eine Konzentration und die Kontinuität in ausgewählten Themen erforderlich.

Die Zielsetzungen des Programms Verbrennung richtet sich nach den Vorgaben des *Konzepts der Energieforschung des Bundes* [1] für die Periode 2008–2011:

### **Verbesserte Forschungsmethoden und -instrumente**

Um die bestehenden Systemen gezielt zu verbessern, sind die Instrumente der Forschung wie physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger 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**

Die erheblich verschärften Emissionsvorschriften (Euro 6 ab 2014, USA 2010/14) erfordern die Reduktion der emittierten Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxide sowie der festen Stoffe (Russ, Feinstaub, PM). Hinzu kommt die Verminderung der Kohlendioxide.

### **Nutzung verschiedener Energieträger**

Die Verbesserung des Wirkungsgrads und die Reduktion der Schadstoffe stellen auch neue Anforderungen an die Zusammensetzung der Brennstoffe. Die Palette der nutzbaren Brennstoffe wird zudem erweitert und die Verbrennungssysteme müssen auch für biogene Brennstoffe optimiert werden.

Daraus werden für die Periode 2008 – 2011 die folgenden 6 Schwerpunkte abgeleitet:

1. Weiterentwicklung der Forschungsmethoden und –instrumente für konventionelle und für biogene Energieträger
2. Verbesserung und stärkere Vernetzung der experimentellen und numerischen Methoden für die Optimierung des Gesamtsystems „Motor“ umfassend die Prozesskette Gemischbildung – Zündung - Verbrennung - Abgasnachbehandlung
3. Darstellung von „Null-Emission-Systemen“ für die kleinskalige (10 kW bis 100 kW) kombinierte Strom-Wärme-Kälte-Erzeugung (inkl. Wärmepumpen und Biomasse) und für PW-Antriebe.
4. Optimierung der Gemischaufbereitung, Verbrennung und Abgasnachbehandlung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim (Teil-) Einsatz von biogenen Kraftstoffen.
5. Optimierung der Gemischaufbereitung und Verbrennung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim Einsatz von konventionellen und biogenen Kraftstoffen in der atmosphärischen Verbrennung im kleinskaligen Bereich.
6. Stärkere Vernetzung und Auftritt der Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung und –industrie inkl. Leistungserbringern von Komponenten.

# 1. Einleitung

„Am Anfang war das Feuer“ lautete der Titel des oscarprämiierten Films von Jean-Jacques Annaud. Darin wird die Bedeutung des Feuers für die Entwicklung unserer Zivilisation am Beispiel der Menschen in der Steinzeit vor über 80'000 Jahren dargestellt. Das Feuer als wichtigster Energieumwandlungsprozess war jedoch über Jahrtausende auf die einfache Gewinnung von Wärme sowie auf die Vernichtung von brennbaren Materialien und dadurch auch eine grosse Gefahrenquelle durch Brände reduziert. Erst mit der Erfindung der Dampfmaschine, der Nutzbarmachung von fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdöl und – später dann – von Erdgas konnte die Industrialisierung im grossen Stil beginnen. Die Menschheit konnte damit im Gegensatz zur Wasserkraft, die schon früher als arbeitsfähige Energie genutzt wurde, weitgehend standortunabhängig Wärme und Kraft erzeugen. Erst im 19. Jahrhundert kamen die Verbrennungskraftmaschinen wie die Diesel- und Ottomotoren sowie die Gasturbine hinzu. Zusammen mit den Dampfkraftanlagen dominieren diese Systeme heute die Nachfrage nach Antriebsenergie für Fahrzeuge, Generatoren und Maschinen. Hinzu kommt der hohe Anteil von durch Verbrennung erzeugter Wärme für die Beheizung von Gebäuden und Produktionsprozessen.

Der durch die Verbrennung von Energieträgern erzeugte Anteil an nutzbaren Energieformen wie Wärme, Kraft und (indirekt) Strom erreicht weltweit einen Anteil von 85 % und in der Schweiz von etwas über 75% am Gesamtenergiebedarf. Der Anteil in der Schweiz ist geringer, weil die Stromerzeugung vorwiegend durch Wasserkraft und Nuklearkraftwerke erfolgt.

Ohne enorme finanzielle Anstrengungen werden der Verbrauch an fossilen Energieträgern und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zukunft weltweit noch deutlich zunehmen. Davon geht auch die Internationale Energie Agentur (IEA) in ihren

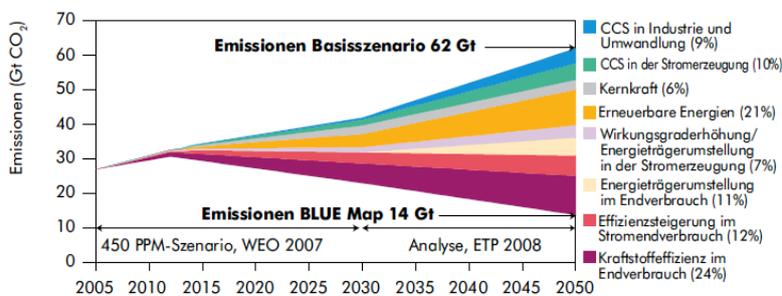


Fig. 1. Vergleich 450 PPM-Stabilisierungsszenario des World Energy Outlook 2007 und BLUE-Map-Szenario. 2005-2050

Energy-Technologie-Perspektiven 2008 (ETP) [2] aus. Für die Stabilisierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 auf das heutige Niveau (Szenario „Act“) werden jährlich Investitionen von 400 Milliarden USD und für eine Reduktion um 50% (Szenario „Blue“) sogar jährlich 1'100 Milliarden USD benötigt (Fig. 1). Wichtigste Massnahmen sind CO<sub>2</sub> Capture and Storage (CCS), Effizienz-

verbesserung im Transportsektor und Energieeinsparungen in Gebäuden. Die Schweizer Vision einer 2000 Wattgesellschaft verfolgt ähnliche Ziele, setzt jedoch den pro Kopf-Energieverbrauch als Leitgrösse. Zudem soll der Anteil an erneuerbaren Energieträgern, die ebenfalls vorwiegend durch Verbrennung in nutzbare Energieformen umgewandelt werden, deutlich erhöht werden. Auch in der Zukunft wird die Verbrennung der wichtigste Energieumwandlungsprozess bleiben.

Trotz der seit Jahrtausenden genutzten Energieumwandlungsform und der seit über hundert Jahren millionenfach hergestellten Verbrennungskraftmaschinen bestehen Lücken im Wissen über die komplexen molekularen, chemischen, thermischen und kinetischen Vorgänge im Verbrennungsprozess sowie ein Verbesserungspotential in der Konstruktion und im Betrieb der Energieumwandler. Schwerpunkte sind die Erhöhung des Wirkungsgrads unter Berücksichtigung der Lastzustände in der Praxis, die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie der für die natürliche Umwelt nachteiligen und für den Menschen gesundheitsgefährdenden Schadstoffe. Hinzu kommt die Anwendung von neuen Brenn- und Treibstoffen insbesondere aus erneuerbaren Quellen.

Der dominante Anteil der Verbrennung an der Nutzbarmachung von Energieträgern zeigt den Bedarf und den Nutzen einer auch schon geringen Verbesserung. Eine Verbesserung des Wirkungsgrads aller Verbrennungssysteme um 1% senkt den weltweiten Energieverbrauch um 0.85%. Die Verbrennungsforschung und -entwicklung erfolgt international mit hoher Kompetenz. Für die Grössenverhältnisse der Schweiz erfordert dies eine Konzentration der Kräfte auf ausgewählte Themen und eine internationale Vernetzung. In der Vergangenheit waren die wichtigsten Akteure in Ihren Fachgebieten durchaus international kompatibel. Dies wurde beispielsweise durch die Teilnahme an im Wettbewerb vergebenen Forschungsprojekten der FVV [3], die Mitarbeit an Projekten im Forschungsprogramm der EU und in Arbeitsgruppen der Internationalen Energieagentur sowie die Zulassung von Referaten und Postern an international renommierten Forschungskonferenzen wie dem International Symposium on Combustion [4] bestätigt. Hinzu kommen aufgrund von Forschungsvorhaben realisierte Verbesserungen von Komponenten bis hin zu gesamten Systemen wie beispielsweise dem Swissmotor. Die Industrie ist aufgeteilt in die Entwicklung und die Herstellung von Verbrennungsmotoren, Gasturbinen, Heizgeräten und dazugehörigen Komponenten sowie die Beratung und das Engineering.

## 2. Systemdarstellung und –abgrenzung der Verbrennungsforschung

### 2.1. Systemdarstellung Planung und Steuerung Forschungsbereich

Die Evaluation sowie die Planung und Steuerung der künftigen Forschungsschwerpunkte kann als Regelkreis dargestellt werden (Fig. 2). Die Führungsgrösse wird durch die übergeordneten Ziele und Vorgaben des Bundes namentlich des BFE und der CORE bestimmt. Die Gegebenheiten des Umfelds (Umsysteme) und insbesondere die erwartete zukünftige Veränderung und Entwicklung sind wichtige Einflussfaktoren, die den Inhalt des Konzeptes mitbestimmen. Sie bilden die zu beachtenden Rahmenbedingungen. Die IST-Situation oder das zu steuernde und zu verändernde System ist beschrieben durch den Stand der Technik im direkten Einflussbereich, also auf nationaler Ebene. Der internationale Stand der Technik ist als kompetitives Umfeld in die Betrachtungen mit einzubeziehen und ist eine weitere Inputgrösse für den Regelkreis zur Konzeption der Verbrennungsforschung.

Der Prozess der Konzeptevaluation umfasst das Einholen und das Aufarbeiten der relevanten Informationen über die Führungsgrösse, die Umsysteme sowie den Stand der Technik und das Ableiten von Themen, Richtungen und Zielsetzungen in der Form von Schwerpunkten der zukünftigen Verbrennungsforschung. Im Detailkonzept und im Rahmen der Programmleitung werden Massnahmen, Mittel und Wege festgelegt, nach denen Forschungsprojekte initiiert oder beurteilt werden. Die Massnahmen bewirken eine Veränderung des Standes der Technik. Diese ist zu erfassen und mit den Vorgaben und Rahmenbedingungen zu vergleichen. Sind Abweichungen vorhanden müssen die Massnahmen überprüft und angepasst werden. Dies gilt auch, falls sich die Einflussfaktoren geändert haben oder neue hinzukommen. Die Beobachtung und die Erfassung relevanter Einflussfaktoren und damit die Planung und die Steuerung des Forschungsprogramms sind somit Daueraufgaben.

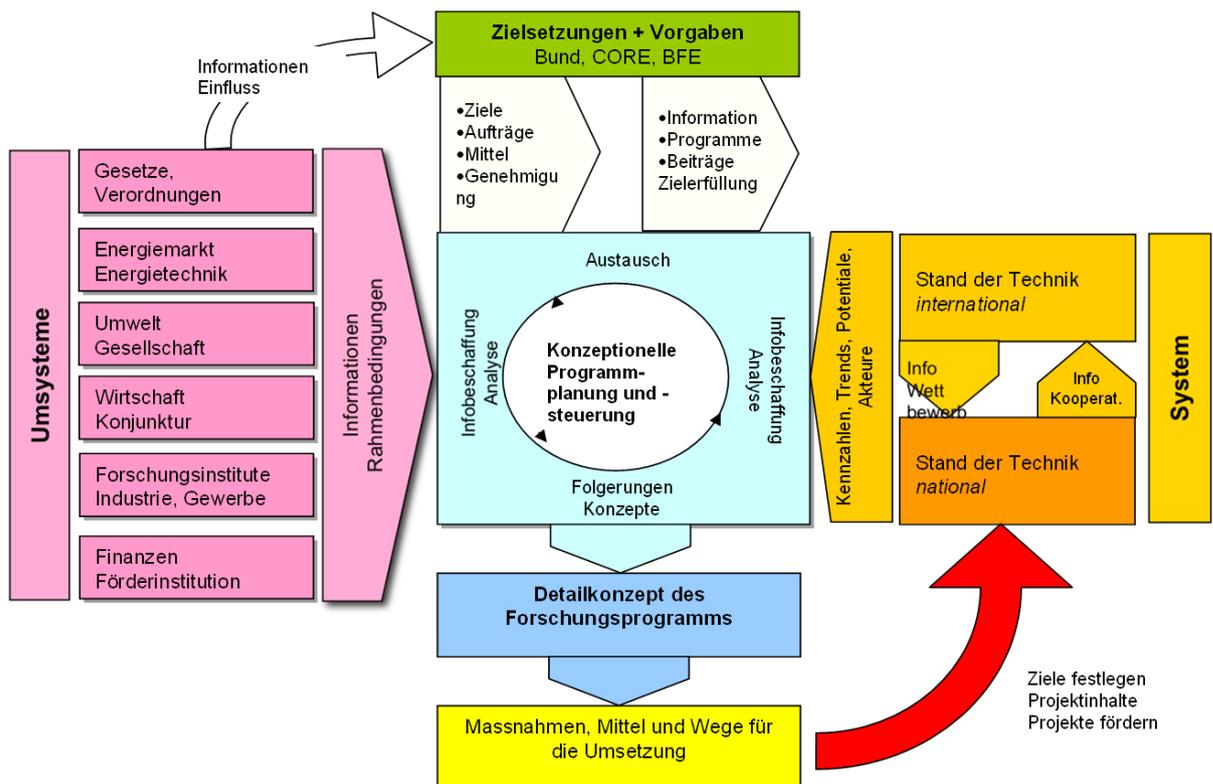


Fig. 2: Systemdarstellung Planung und Steuerung Verbrennungsforschung

## 2.2 Systemdarstellung Verbrennung

Die Verbrennung ist als thermochemischer Energieumwandlungsprozess eine Querschnittstechnologie, die für zahlreiche *Energieträger* eingesetzt werden kann und in verschiedenen *Formen und Systemen* zur Anwendung kommt. Dazu gehören die einfache Raumheizung (atmosphärische Verbrennung), der Antrieb von Fahrzeugen in allen Dimensionen (nicht stationäre Verbrennung) oder auch das 500 MW Gasheizkraftwerk (stationäre Hochdruckverbrennung) (Fig. 3).

Energieumwandler	Energieträger	mobile Nutzung	stationäre Nutzung
Verbrennungsmotor	Benzin, Diesel Schweröl Erdgas, Wasserstoff Ethanol Biogas, -diesel Designer Fuel	Fahrzeug Eisenbahn Schiff Flugzeug	Notstrom BHKW KW HKW
Gasturbine	Erdgas Erdöl, Kerosin Biogas Designer Fuel	Flugzeug Schiff	BHKW KW HKW
Heizkessel Dampfkessel	Heizöl Erdgas Holz		Raumwärme Prozesswärme KW, HKW
Abfallverbrennung	Abfälle		Reduktion Strom, Fernwärme
industr. Feuerung	diverse		industr. Prozesse

Fig. 3: Übersicht Energiewandler mit Verbrennung

Nimmt man die *Forschungsbereiche* hinzu, ergibt sich eine dreidimensionale Matrix (Fig. 4).

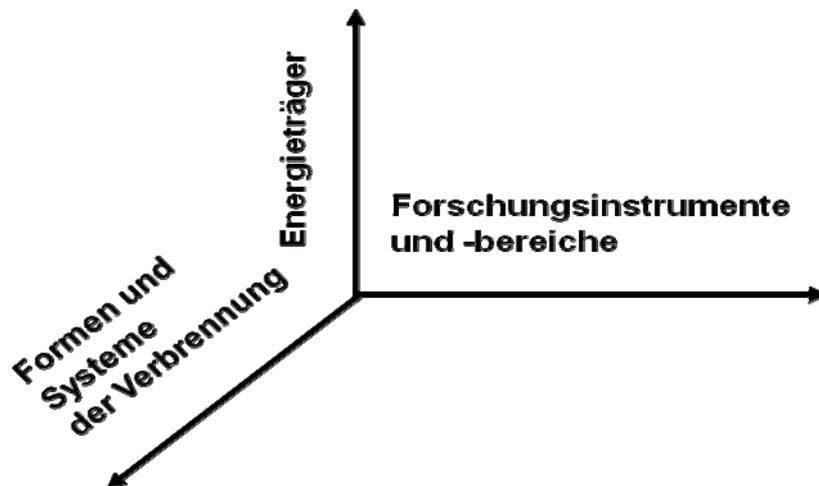


Fig. 4: Die Zuordnung der Forschungsthemen kann in einer Matrix dargestellt werden.

### 2.2.1 Formen und Systeme der Verbrennung

Eine Strukturierung der verschiedenen Formen der Verbrennung ist aus physikalischer Sicht nach der Art der Gemischbildung und dem Strömungsbild (Fig. 5) sowie der Dauer und den Druckverhältnissen (Fig. 6) zweckmässig. Die Form der Verbrennung weist auch auf die möglichen Systeme hin, welche die aus der Verbrennung entstehende Energie in eine technisch nutzbare Form umwandeln.

Brennstoff-Gemischbildung	Strömungstyp	Verbrennungssysteme
vorgemischt	turbulent	Otto-Motor (Benzin, Gas) Stationäre Gasturbine
	laminar	Flache Flamme (Porenbrenner) Bunsenbrenner
nicht vorgemischt	turbulent	Diesel-Motor Flugzeugtriebwerk (Turbine) Kohlestaub-Verbrennung
	laminar	Kerze Holzfeuer, feste Brennstoffe Ölbrenner

Fig. 5: Verbrennungssysteme (Auswahl) geordnet nach Gemischbildung und Flammenform.

Kategorie	Eigenschaften	Verbrennungssystem	Nutzenergie
<b>atmosphärische Verbrennung</b> (Kessel-Feuerungen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- drucklos</li> <li>- vorgemischt</li> <li>- nicht vorgemischt</li> <li>- laminar</li> <li>- feste, flüssige, gasförmige Brennstoffe</li> <li>- kontinuierliche Brennstoffzufuhr und Abbrand oder grosser Brennstoffvorrat</li> <li>- feste Brennraumgeometrie (oder offen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Heizkessel Öl, Gas</li> <li>- Holzfeuerung</li> <li>- Abfallverbrennung</li> <li>- Feuerungen für Industrieprozesse</li> <li>- Dampfkessel</li> <li>- Stirling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Raumwärme (indirekt, direkt)</li> <li>- Prozesswärme (indirekt, direkt)</li> <li>- Kraft für Antriebe (via Dampfmaschine, -turbine, Stirling)</li> <li>- Volumenreduktion und chemische Umwandlung (Abfälle)</li> </ul>
<b>nicht stationäre Verbrennung</b> (Motoren)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- unter Druck (variabel)</li> <li>- vorgemischt oder nicht vorgemischt</li> <li>- turbulent</li> <li>- flüssige, gasförmige Brennstoffe</li> <li>- nicht kontinuierliche Brennstoffzufuhr</li> <li>- variable Brennraumgeometrie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbrennungsmotor (Diesel, Otto, Wankel etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kraft für direkte Nutzung (Fahrzeuge, Antrieb von Maschinen und Geräten, Schiffe, Flugzeuge)</li> <li>- Kraft für Antrieb von Generatoren</li> <li>- Wärme</li> </ul>
<b>stationäre Hochdruckverbrennung</b> (Gasturbinen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- unter Druck (konstant)</li> <li>- vorgemischt oder nicht vorgemischt</li> <li>- turbulent</li> <li>- flüssige, gasförmige Brennstoffe</li> <li>- kontinuierliche Brennstoffzufuhr und Abbrand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gasturbine</li> <li>- Triebwerk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kraft für direkte Nutzung für Antrieb von Fahrzeugen (Flugzeug)</li> <li>- Kraft für Antrieb von Generatoren (Gaskraftwerk)</li> </ul>

Fig. 6: Verbrennungssystem (Auswahl) geordnet nach Dauer und Druckverhältnissen.

## 2.2.2 Forschungsinstrumente und -bereiche

### a) Instrumente für die Verbrennungsforschung (Grundlagen, Methoden, Mittel)

Für die Untersuchung an Verbrennungssystemen oder die Konzeption von Verbesserungen sind Kenntnisse über die physikalischen Grundlagen, Methoden zur Messung und Berechnung der Vorgänge sowie Mittel für die entsprechenden Versuche erforderlich. Diese sind teilweise unabhängig von der Art der Verbrennung und teilweise auch spezifisch für die einzelnen Verbrennungssysteme zu erarbeiten (Fig. 7).

Bereich	Beispiele	Anwendungen
physikalische Grundlagen	Reaktionspfade und Reaktionskinetik	Datengrundlagen für die numerische Simulation
Messmethoden und Instrumente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- LIF (Laserinduzierte Fluoreszenz) für NO oder OH</li> <li>- LII (Laserinduzierte Inkandescenz) für Russ-Partikel</li> <li>- High Speedkamera</li> <li>- Schlieren</li> <li>- Particle Image Velocimetry (PIV)</li> <li>- weitere</li> </ul>	Visualisierung der Einspritzung, Gemischbildung und Verbrennung; Visualisierung Verbrennungskomponenten, Russpartikel Validierung von Berechnungsmodellen Strömungsuntersuchungen in Abgasnachbehandlungssystemen
Numerische Simulation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Computational Fluid Dynamics (CFD)</li> <li>- Computational ReactivFluid Dynamics (CRFD)</li> <li>- Large Eddy Simulation (LES)</li> <li>- Lattice Boltzmann Simulationsmethoden</li> <li>- etc.</li> </ul>	Simulation von Vorgängen der Verbrennung (Einspritzung, Gemischbildung, Flammfront, Verbrennung) Simulation von Verbrennungssystemen Simulation Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe
Entwicklung von Versuchsträgern	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einhubtriebwerk mit optischen Zugängen (EHT)</li> <li>- Hochtemperatur und -druckzelle (HTDZ)</li> <li>- Versuchszylinder</li> <li>- Versuchsmotoren</li> <li>- etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untersuchung von Einspritzsystemen</li> <li>- Zündvorgänge</li> <li>- Flammenfront</li> <li>- Turbulenzen</li> <li>- Validierung der Berechnungsmodelle</li> </ul>

Fig. 7: Übersicht Instrumente der Verbrennungsforschung

**b) Prozessorientierte Themen der Verbrennungsforschung**

Unabhängig von der Art lässt sich der Verbrennungsprozess in folgende Teilprozesse gliedern:



Fig. 8: Prozesskette der Verbrennung

Teilprozess	Komponenten/ Verfahren	Instrumente
Brennstoffaufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vergasung</li> <li>- Mischung (Blends)</li> <li>- Vorverdampfung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versuchsträger</li> <li>- Charakterisierung</li> <li>- Visualisierung</li> </ul>
Gemischbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einspritzsystem</li> <li>- Düsen</li> <li>- Vormischkammern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulationsmodelle</li> <li>- Visualisierung</li> <li>- Versuchsträger</li> </ul>
Zündung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorbrennkammer</li> <li>- Brennraum (Zylinder)</li> <li>- Brennkammer</li> <li>- HCCI</li> <li>- Low Temperatur Combustion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reaktionsanalyse</li> <li>- LII, LIF</li> <li>- Prüfstände</li> </ul>

Verbrennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brennraum</li> <li>- Brennkammer</li> <li>- Kessel</li> <li>- Messsysteme</li> <li>- Prozesssteuerung (Ventiltrieb)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulationsmodelle</li> <li>- Visualisierung</li> <li>- Versuchsträger</li> </ul>
Abgasbehandlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abgasrezirkulation</li> <li>- SCR-Katalysator</li> <li>- 3-Weg-Katalysator</li> <li>- Dieselpartikelfilter</li> <li>- Rauchgaszyklone</li> <li>- Elektrofilter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versuchsträger</li> <li>- Gasanalytik</li> <li>- Mikroskopie</li> <li>- Werkstoffanalytik</li> </ul>
gekoppelte Prozesse und Gesamtprozess	reale Systeme (Motoren Gasturbinen, Heizkessel mit Brennstoffzufuhr bis zum Abgassystem; auf Prüfstand, im Einsatz)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Versuchsträger Einspritzung - Brennraum – Abgasbehandlung</li> <li>- Mess-, Steuerungs- und Regulierungssysteme</li> <li>- Versuchsmotoren</li> <li>- Systeme im realen Einsatz</li> <li>- Rollprüfstände</li> </ul>

Fig. 9: Übersicht Forschungsthemen der Verbrennungsteilprozesse (Beispiele zur Illustration)

### 2.2.3 Brennstoffe

Die physikalische Form und die Zusammensetzung des Brennstoffs haben einen massgebenden Einfluss auf den Verbrennungsprozess, die Komponente der Abgase aber auch auf die Konzeption des Verbrennungssystems bis hin zur Betriebstüchtigkeit und Lebensdauer. Hinzu kommen weitere technische Eigenschaften (Lager- und Förderfähigkeit) sowie ökonomische (Verfügbarkeit, Preise), ökologische (Umwelteinflüsse der Gewinnung) und soziale (beispielsweise Konkurrenz von pflanzlichen Brennstoffen zu Nahrungsmittel). In der Verbrennungsforschung muss die Verfügbarkeit, die Art und die Umwelteinflüsse der Brennstoffe zumindest ein Teilaspekt sein.

Die Forschungstätigkeit ist einerseits auf die in der Zukunft relevanten Brennstoffe zu fokussieren und andererseits müssen aus den Erkenntnissen über den Verbrennungsprozess Vorgaben an die Zusammensetzung und die Eigenschaften gestellt werden.

Kategorie	Art	Form	Eigenschaften/Themen
fossile Brennstoffe	Erdgas Erdöl Kohle	gasförmig flüssig fest	Endlichkeit der Ressourcen CO <sub>2</sub> , Treibhauseffekt hohe Energiedichte, günstig grosse Distribution
regenerative Brennstoffe	Holz Biomethan Ethanol Biodiesel Rapsöl	gasförmig flüssig fest	Beschaffung, Verfügbarkeit Konkurrenz Nahrungsmittel Vielfältige Zusammensetzungen; unbekannte Auswirkungen, Stabilität, für Verbrennungssystem problematische Inhaltsstoffe Soziale, ökologische Auswirkungen
Synthetische Brennstoffe und diverse Brennstoffe	Biomass to Liquid (BtL) Waste-to-Liquid Landfill Gas Residual Gas Abfall Sonderabfall Wasserstoff	gasförmig flüssig fest	Weitgehend ähnliche Themen wie für regenerative Brennstoffe Problematische Inhaltsstoffe bei Gewinnung aus Abfällen noch verstärkt  Speziell ist Wasserstoff: nur die Herstellung und die dafür erforderliche Primärenergie sind zu diskutieren

Fig. 10: Verschiedene Brennstoffkategorien zur Illustration der vielfältigen Anforderungen an die Verbrennung (inkl. Brennstoffaufbereitung und Abgasnachbehandlung).

### 2.3 Systemabgrenzung und Vernetzung zu anderen BFE-Forschungsprogrammen

Die Verbrennungsforschung ist primär auf den Verbrennungsprozess mit den Teilbereichen Brennstoffe, Brennstoffaufbereitung, Einspritzung, Zündung, Verbrennung und Abgasbehandlung fokussiert. Die Herkunft und Zusammensetzung der Brennstoffe wie fossile Energieträger, Biomasse oder Wasserstoff werden in anderen Forschungsprogrammen des BFE [5] untersucht. Dasselbe gilt für den praktischen Einsatz der Systeme mit der Verbrennung als Energieumwandlungsprozess. Dazu gehören Motoren in Fahrzeugen (Verkehr), Motoren und Gasturbinen für die Strom- und Wärmeerzeugung (Kraftwerk 2020, Wärmekraftkoppelung) oder Heizkessel für die Gebäudebeheizung (Gebäude, Biomasse & Holzenergie). Die Brennstoffzelle mit ihrem elektrochemischen Energieumwandlungsprozess weist in vielen Bereichen ähnliche Schnittstellen zu anderen Forschungsprogrammen auf (Fig. 11)

Um Doppelspurigkeiten zu vermeiden, ist eine Abgrenzung zu den anderen Forschungsprogrammen des BFE erforderlich und in vielen Projekten auch eine gute Vernetzung und Zusammenarbeit notwendig. So sind die Anforderungen und Rahmenbedingungen der Energieanwendungen und damit die Deckung der Bedürfnisse respektive das Generieren eines Nutzens für den Endverbraucher relevante Vorgaben für die Entwicklung und Verbesserung der Verbrennungsprozesse. So hat beispielsweise die Zielsetzung der Vision „Die 2000-Wattgesellschaft“ [6], die Gebäude in der Zukunft ohne fossile Energieträger zu beheizen, einen massgebenden Einfluss auf die weitere Entwicklung von Heizkesselanlagen oder aus dem Trend zu Hybrid- und Elektroantrieben für Fahrzeuge entsteht der Bedarf nach kleinen Verbrennungsmotoren mit einem speziellen Lastprofil. Die sozialen und ökologischen Auswirkungen der Gewinnung der diversen biogenen Brennstoffe sind bei deren Auswahl für die Verbrennung zu Berücksichtigen. Umgekehrt sind die technischen und physikalischen Auswirkungen der biogenen Brennstoffe auf den Verbrennungsprozess in einer Gesamtbeurteilung der Eignung für die Energieversorgung ebenfalls mit einzubeziehen.

Eine gute Kommunikation und ein konsequenter Informationsaustausch zwischen den einzelnen Programmen ist deshalb sehr wichtig. Die Anträge für Forschungsprojekte sollten deshalb jeweils von den mitbetroffenen Programmverantwortlichen mit evaluiert werden.

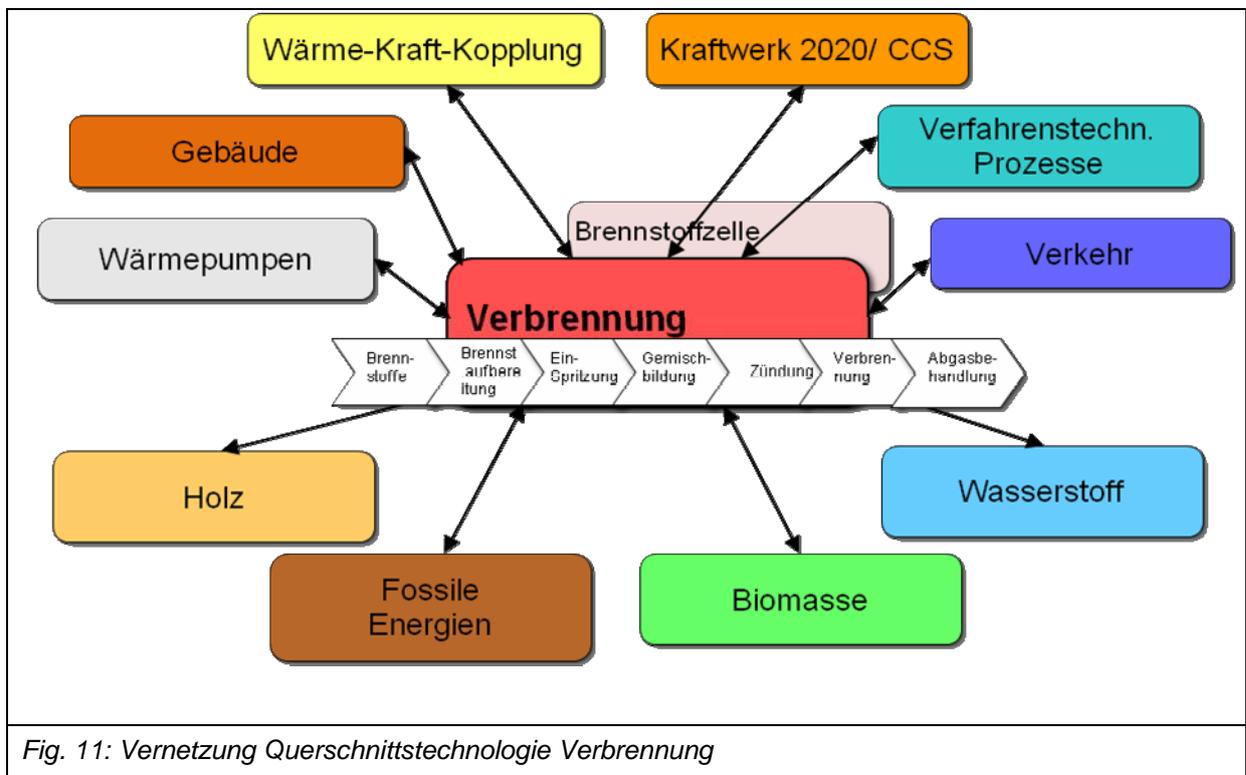


Fig. 11: Vernetzung Querschnittstechnologie Verbrennung



kessel für Holz werden von einer grösseren Anzahl kleinerer Hersteller angeboten. Durch die in den vergangenen 2 - 3 Jahren stark gestiegene Nachfrage nach Pelletsheizungen sind einige grosse international positionierte Heizkesselhersteller in diesen Markt eingestiegen.

Durch die Realisierung (Neubau, Sanierung) von immer besser isolierten Gebäuden sinken der Wärmebedarf und die erforderliche Wärmeleistung zunehmend. Hinzu kommen additive Wärmegewinnungssysteme (z.B. Solar), welche den Wärmebedarf von Heizkesseln zusätzlich reduzieren. Gasheizgeräte sind bereits heute für kleine Leistungen (< 10 kW) verfügbar.

Bei Ölheizkesseln liegt die untere Leistungsgrenze bei rund 10 - 15 kW. Die Durchmischung des eingespritzten flüssigen Brennstoffs mit der Luft, ist bei kleinen Leistungen schwierig und eine Modulierung nicht mehr möglich. Bei geringerem Leistungsbedarf müssen die Anlagen mit kurzen Laufzeiten im Ein-/Ausschaltmodus betrieben werden. Dadurch entstehen höhere Stillstandsverluste und die erhöhten Emissionen im Anfahr- und im Abschaltbetrieb werden relevant (Brennraumtemperatur und Strömungsverhältnisse ungünstig, Tropfenbildung mit Russ als Folge). Der Nachweis der Emissionen erfolgt nach Vorgabe der Luftreinhalteverordnung im Dauerbetrieb (Nennbetriebszustand) womit die vorgenannten Anfahr- und Abschaltmissionen nicht erfasst werden.

Das Erreichen von kleineren Leistungen bei Ölfeuerungen wird nur durch eine Vorverdampfung (VVT = Vorverdampfertechnologie) erreicht. Zwei Varianten dazu wurden bereits in der Schweiz geprüft. In einem vom BFE und von der KTI unterstützten Projekt der Firma Toby wurde der Plutobrenner zur Marktreife entwickelt. Dieser wird heute in verschiedenen Produkten [8] erfolgreich verkauft. Im Plutobrenner wird das Heizöl durch einen Rotationszerstäuber auf eine durch die Abgase beheizte Oberfläche verteilt und verdampft. Im Brennerrohr wird in der Folge das gasförmige, mit der Verbrennungsluft vorgemischte Heizöl ohne Russ verbrannt. Das von L. Griesser entwickelte CatVap-Verfahren [9] nutzt die durch eine katalytische Verbrennung eines Teilstroms des zugeführten Heizöls als Wärme- und Strahlungsquelle für die Verdampfung des Heizöls. Das Verfahren ist unabhängig von einer Beheizung durch die Abgase und kann somit für andere Systeme als Heizkessel eingesetzt werden. Die Marktreife wurde noch nicht erreicht.

Durch die starke Verbesserung und die Kommerzialisierung der seit langem bekannten Holz-Pellets-Heizungen, werden den heutigen Komfortansprüchen der Hausbesitzer entsprechende Systeme auch für den kleineren Leistungsbereich angeboten. Analog zu den übrigen Systemen wird auch hier eine weitere Reduktion der Heizleistung gefordert. Generell problematisch sind bei Holzheizungen die Rauchgasemissionen, die einen grösseren Feinstaubanteil enthalten als andere Systeme.

#### Zukünftige Anforderungen:

- Ölheizkessel: Verbesserung für kleinere Leistungen  
weitere Reduktion NO<sub>x</sub>, Russ  
Verbesserung Anfahr- und Abschaltbetrieb (Regeltechnik, Einbindung)
- Gasheizkessel: weitere Reduktion NO<sub>x</sub>  
Verbesserung Anfahr- und Abschaltbetrieb
- Holzheizkessel: wird im BFE-Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie behandelt
- Andere, biogene Brennstoffe: Die verbreiteten Brenner/Heizkesselkonzepte sind nicht für biogene Brennstoffe ausgelegt. Eine Adaption - insbesondere in kleinen Leistungsbereichen - ist erforderlich.



**Problematik:** Relevante Emissionen sind NO<sub>x</sub>, CO, HC, Russ, PM (Particulate Matter, Nanopartikel). Dieselmotoren werden mit Luftüberschuss betrieben, weshalb eine Reduktion der Schadstoffe mit einem 3-Wege-Katalysator, wie er seit Jahren als Standard bei Benzinmotoren eingesetzt wird, nicht möglich ist. Die Adaption des für stationäre Anlagen (Kraftwerke) ebenfalls seit mehr als 20 Jahren erprobten SCR-Katalysator mit Harnstoffeinspritzung für mobile Anlagen hat grössere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfordert. Vom BFE mitfinanzierte Projekte, haben einen wichtigen Beitrag dazu geleistet. Neue LKW's werden seit rund zwei Jahren mit SCR-Katalysatoren ausgeliefert. Die ersten PKW's mit Katalysatoren sind seit Anfang 2008 erhältlich. Der Einsatz von Katalysatoren wurde durch die verschärften Emissionsvorschriften erforderlich.

Zuvor konnten die Abgasvorschriften durch innermotorische Massnahmen (Verbesserung der Einspritzsysteme, Brennraumgeometrie, Druckverhältnisse, Verbrennungstemperatur) eingehalten werden. Verschiedene Massnahmen zur Schadstoffreduktion bewirken jedoch auch eine Reduktion des Wirkungsgrades und der Leistung. Es mussten zusätzliche Optimierungen durchgeführt werden, um den Wirkungsgrad zu halten und besser noch zu steigern. Deshalb sind ladeluftgekühlte Turbolader heute Stand der Technik bei Dieselmotoren nahezu aller Grössenklassen und Einsatzgebiete.

Durch die Gemischbildung im Brennraum, die Selbstzündung und den Abbrand von noch nicht vollständig mit der Luft gemischtem Brennstoff hat der Dieselmotor die Tendenz zur Russbildung. Auch hier gelten verschärfte Vorschriften, die durch innermotorische Massnahmen nicht mehr eingehalten werden können. Es sind Massnahmen ausserhalb des Verbrennungsprozesses erforderlich, die in der Form von Russpartikelfilter umgesetzt werden. Seit 2007 werden in der Schweiz und in der EU neue Fahrzeuge nur noch mit Russfiltern ausgeliefert. In der Schweiz müssen Baumaschinen zudem mit Russfiltern nachgerüstet werden.

Die Emissionsvorschriften werden in den kommenden Jahren nochmals markant verschärft werden. So müssen beispielsweise die NO<sub>x</sub>-Werte für Personwagen zwischen 2006 und 2014 um den Faktor 3 und die Partikelemissionen um Faktor 5 reduziert werden (vgl. Kap. 3.2.3). Um diese Vorgaben zu erreichen und gleichzeitig die Forderung nach höherem Wirkungsgrad zu erfüllen, müssen Verbesserungen an allen Teilsystemen des Verbrennungsprozesses aber auch eine Abstimmung des Gesamtsystems erreicht werden. Dazu gehören die Brennstoffzusammensetzung, die Gemischbildung-Zündung-Verbrennung und die Abgasbehandlung. Um die Verhältnisse des Verbrennungsprozesses, deren Folgen auf die Abgasnachbehandlung und Massnahmen auf die Brennstoffaufbereitung und die Einspritzung in situ zu erfassen und umzusetzen, sind einerseits schnelle Messsonden (beispielsweise ein Entnahmeventil) und andererseits Rechenprogramme und Steuerungssysteme erforderlich.

Die Anstrengungen der Verbrennungsforschung in der Schweiz haben sich in den letzten Jahren auf diese Problemstellung konzentriert und zahlreiche Resultate erzielt.

### **Ottomotoren**

**Anwendungen:** PKW (vorwiegend Benzin; mit Erdgas schwach zunehmend)  
LKW (mit Benzin in Europa keine Bedeutung; Gasmotoren zunehmend)  
(Schiffe, nur noch im Freizeitbereich relevant)  
Notstrom  
Strom (WKK, BHKW)  
Geräte (Rasenmäher, Baugeräte etc.)

**Brennstoffe:** fremdgezündete Brennstoffe wie  
Benzin  
Erdgas  
Biogas  
Ethanol  
Wasserstoff

Wirkungsgrad:

Benzin (häufigste Nutzung):	
PKW	max. ca. 32 % (Betrieb gemittelt 15-30 %)
Geräte	<30 %
Erdgas	
PKW	max. ca. 35 % (Betrieb gemittelt 15-30 %)
BHKW klein	42 % (Swissmotor, andere tiefer)
BHKW gross	40 - 45 %

Fig. 14: Wirkungsgrad Ottomotoren

Emissionen: Relevante Emissionen sind  $\text{NO}_x$ , CO, HC, Russ und PM mit Schwerpunkten bei den besonders gesundheitsgefährdenden und/oder ozonreaktiven Verbindungen (z.B.  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ , PM1 bei direkteingespritzten Benzinmotoren). Die Schadstoffe benzinbetriebener Ottomotoren werden seit über 20 Jahren erfolgreich mit einem 3-Wege-Katalysator mit hoher Rate reduziert. Partikel sind weniger problematisch wie bei Dieselmotoren und können durch innermotorische Massnahmen entsprechend den Schadstoffvorschriften beherrscht werden.

Die Emissionen der Gasmotoren werden ebenfalls mit Katalysatoren reduziert. Problematisch sind der Methanschluß, der als starkes Treibhausgas wirkt, sowie die Auswirkungen der Methankonversion auf die chemische und die thermische Alterung des Katalysators. Für stationäre Motoren mit konstantem (Voll-) Lastbetrieb werden vorzugsweise innermotorische Massnahmen zur Reduktion der  $\text{NO}_x$  eingesetzt (Abgasrückführung, Magermotorenkonzept). Bedingt durch den geringeren Kohlenstoffanteil im Brennstoff sind die  $\text{CO}_2$ -Emissionen von Gasmotoren bei gleichem Energieverbrauch um 25 % geringer.

Die Emissionsvorschriften werden in den kommenden Jahren noch verschärft. Weiterer Verbesserungen sind erforderlich.

### 3.1.3 stationäre Hochdruckverbrennung

#### Gasturbinen

Anwendungen: Kraftwerke (Gaskraftwerke zur Stromerzeugung; auch mit Abwärmenutzung)  
Industrie (Kraftwerke zur dezentralen Stromerzeugung)  
Schiffsantriebe  
Flugzeuge

Brennstoffe: Erdgas  
Kerosin

Wirkungsgrad: Der elektrische Wirkungsgrad von grossen Gaskombianlagen liegt bei 60 %. Andere, vor allem kleinere Applikationen liegen teilweise deutlich tiefer.

Emissionen: Relevante Emissionen bei mit Erdgas betriebenen Gasturbinen sind  $\text{NO}_x$ , CO, HC. Aufgrund der hohen Drücke und Verbrennungstemperaturen sind vor allem die  $\text{NO}_x$ -Emissionen problematisch. Aufgrund der grossen Anforderungen an den Wirkungsgrad ist eine Reduktion nicht mit einfachen Mitteln umsetzbar.

Der Forschungsbedarf für Gasturbinen wird insbesondere im BFE-Forschungsprogramm Kraftwerk 2020 bearbeitet und deshalb hier nicht weiter detailliert.

## 3.2 Analyse der Umsysteme: Situation und künftige Entwicklung

### 3.2.1 Weltweiter und Schweizer Markt

Wie in der Einleitung erwähnt, werden weltweit 85 % des Nutzenergiebedarfs durch Verbrennung abgedeckt. Auch in der Schweiz ist der Anteil mit über 70 % noch sehr gross. Mit den vorwiegend eingesetzten kohlenstoffhaltigen Energieträgern fossilen Ursprungs, werden entsprechend grosse Mengen an CO<sub>2</sub> produziert, was eine der Hauptursachen für den Treibhauseffekt ist. Durch die Reduktion des Energiebedarfs (beispielsweise durch Isolation von Gebäuden), den Einsatz anderer nicht CO<sub>2</sub>-produzierenden oder CO<sub>2</sub>-neutralen Energieträgern (Sonne, Wasser, Wind, Kernenergie, Biomasse) sowie die Effizienzverbesserung der Verbrennungssysteme soll der Anteil der fossilen Brennstoffe in Zukunft reduziert werden.

Die Bestrebungen, den Verbrauch - insbesondere von Erdöl - zu reduzieren, sind bereits seit Jahren im Gange. Trotzdem nahm der Anteil in den vergangenen Jahren weltweit deutlich zu. (Fig. 15). Dazu tragen vor allem auch die aufstrebenden Wirtschaftsräume in Asien aber auch Indien bei.

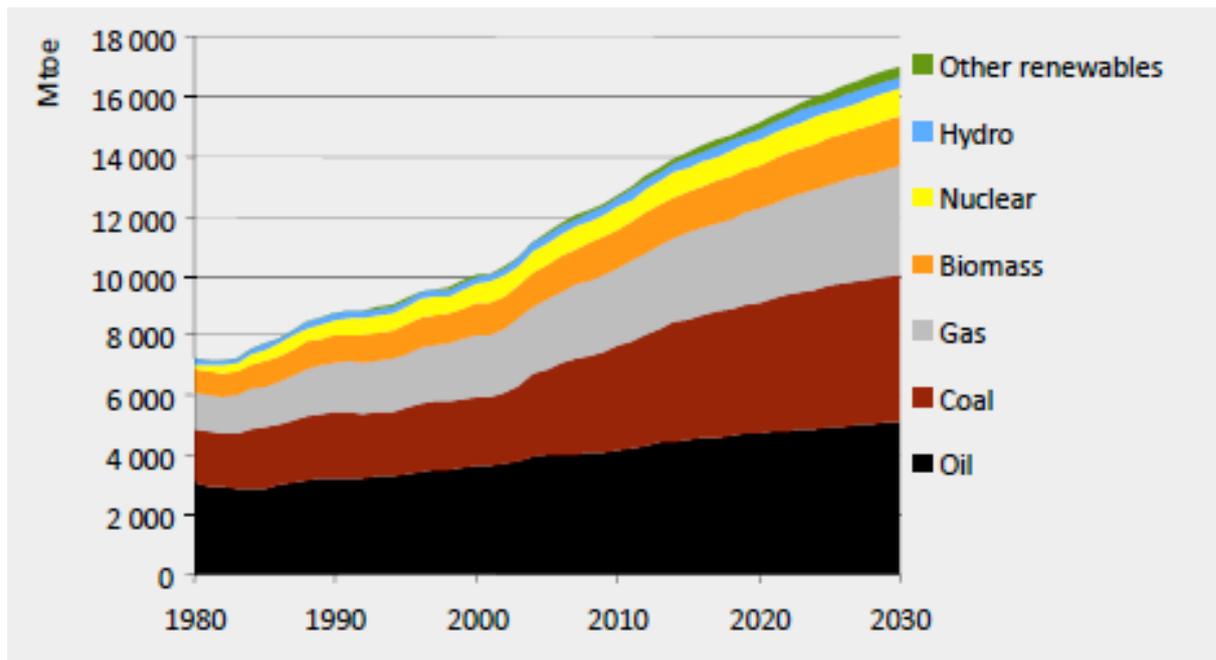


Fig. 15: Weltweiter Primärenergieverbrauch gemäss Referenzszenario der IEA (2008) [2]

International werden Verbrennungssysteme kaum an Bedeutung verlieren. Anlagen, die effizienter sind und damit den CO<sub>2</sub>-Ausstoss pro erzeugte Kilowattstunde reduzieren, werden bessere Absatzchancen als veraltete Systeme haben.

Auch in der Schweiz wird der Anteil der Verbrennungssysteme weiterhin hoch sein. Um so mehr muss der Entwicklung und Implementierung verbesserter Systeme Nachdruck verliehen werden. Die Konkurrenz von anderen Wärmeerzeugungssystemen, wie beispielsweise die Wärmepumpe anstelle des konventionellen Heizkessels zur Beheizung von Gebäuden, wurde in den letzten 2 - 3 Jahren im Markt deutlich spürbar. Bei neu gebauten Einfamilienhäusern steigt der Anteil von Wärmepumpen erheblich (Fig. 16) wogegen der Anteil der Heizkessel (Heizöl, Gas) entsprechend sank (Fig. 17). Daraus entstehen neue Marktchancen für verbesserte verbrennungsbasierte Antriebe von Wärmepumpen im unteren Leistungsbereich.

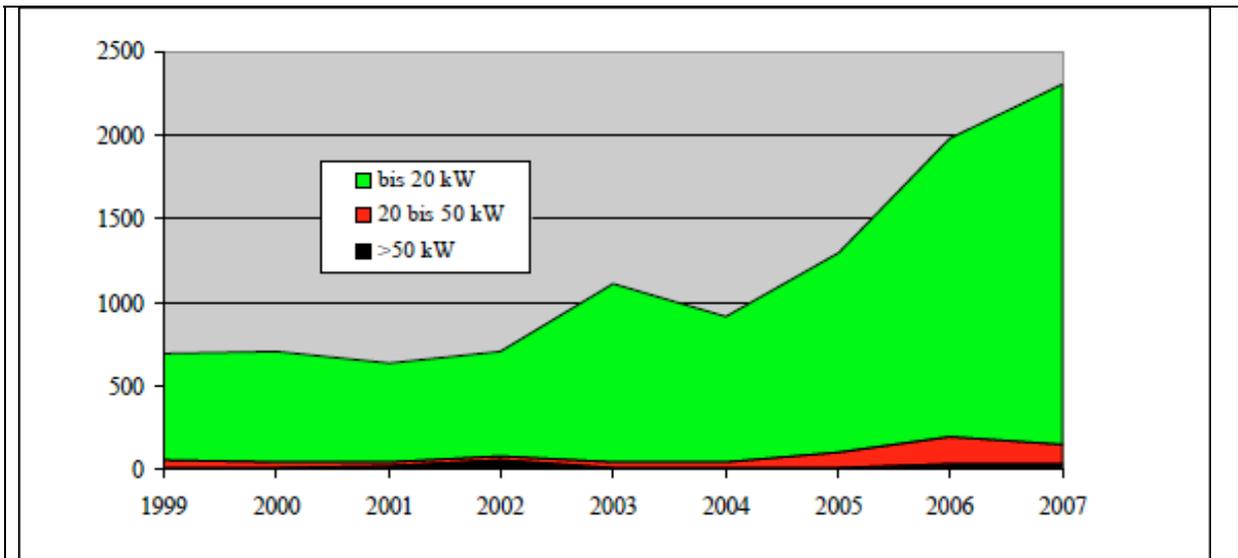


Fig. 16: Entwicklung des Absatzes von Wärmepumpen in der Schweiz; abgesetzte Stückzahlen [10]

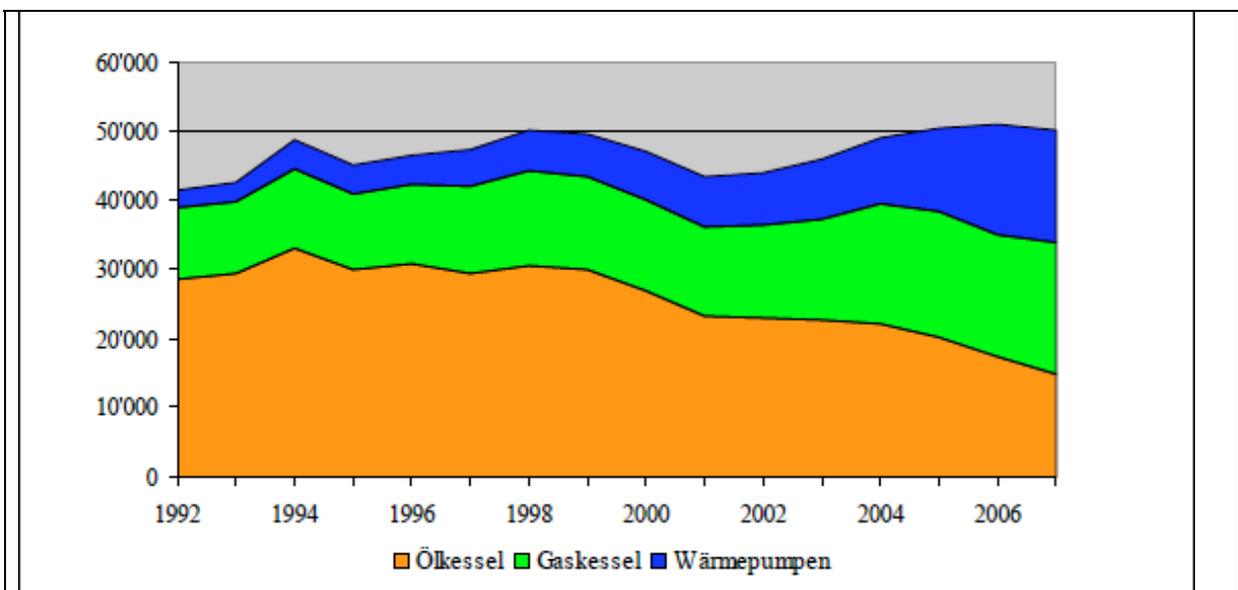


Fig. 17. Wärmereizgermarkt abgesetzte Stückzahlen Heizkessel Öl, Gas sowie Wärmepumpen [10]

Der Einsatz von Verbrennungssystemen für die grossskalige Stromerzeugung wird in der Schweiz wohl auch in den nächsten Jahren einer kontroversen (politischen) Diskussion ausgesetzt sein. Die Forderung, einen grossen Teil des produzierten CO<sub>2</sub> in der Schweiz zu kompensieren (und wohl auch die noch bis Mitte 2008 enorm gestiegenen Preise für Erdöl und Erdgas) sowie politische Widerstände waren Ursache, dass einige Projekte für Gas-Kombi-Kraftwerke wiederum fallen gelassen wurden.

Der Mobilitätsbereich wird in den Segmenten Personenwagen und Nutzfahrzeuge auch in Zukunft durch den Verbrennungsmotor als Antriebssystem dominiert sein. Hybridsysteme in unterschiedlicher Ausprägung stellen neue technische Anforderungen an den Verbrennungsmotor dar. Gefordert sind generell Systeme mit geringerem Kraftstoffverbrauch und tieferen Emissionen.

Bei den Industrie- und Gewerbeunternehmen mit relevanten Aktivitäten im Bereich von Verbrennungssystemen, fand in den letzten Jahren eine erhebliche Strukturbereinigung statt. Ehemalige schweizerische Motorenhersteller, wie Sulzer in Winterthur oder Saurer in Arbon, wurden vor einiger Zeit von ausländischen Firmen übernommen und restrukturiert. Die verbleibenden Unternehmensteile sind heute Forschungs- und Entwicklungszentren, die dadurch einen grossen Einfluss auf die Verbesserung der Verbrennungssysteme haben. Die Zusammenarbeit mit den Schweizer Hochschulen ist gut etabliert und zahlreiche, durch das BFE mitfinanzierte Projekte, wurden erfolgreich umgesetzt. Eine ähnliche Beschreibung gilt auch für die Alstom Gasturbinenentwicklung in der Schweiz (ehemals BBC respektive ABB).

Die grossen schweizerischen Hersteller von Brennern und Heizkesseln wie Elco, Oertli, Ygnis, wurden von ausländischen Firmen übernommen und betreiben in der Schweiz nur noch Vertriebsgesellschaften.

Zusammenfassend kann der Markt nach wie vor als sehr gross und international ausgerichtet bezeichnet werden. Die Anforderungen an die Verbrennungssysteme bezüglich Effizienz und Schadstoffemissionen sind in den letzten 2 - 3 Jahren stark gestiegen und werden auch weiterhin zunehmen. Die Schweizer Verbrennungsforschung kann mit den Entwicklungszentren von international tätigen Unternehmen aber auch mit der Zulieferindustrie einen wichtigen Beitrag dazu leisten.

### 3.2.2 Vorgaben des Bundes (CORE, BFE)

Die Zielsetzungen des Bundes an die Energieforschung sind im Energieforschungskonzept für die Periode 2008 bis 2011 festgeschrieben. Basis dafür ist die Vision einer 2000-Watt-Gesellschaft [6] in der gemittelt maximal 2000 Watt pro Person respektive jährlich 17'520 MWh Energie verbraucht werden. Daraus leiten sich folgende Ziele ab:

- Der Energiebedarf verringert sich um den Faktor 2.5
- Der CO<sub>2</sub>-Ausstoss beträgt eine Tonne pro Person und Jahr
- Die Schadstoffemissionen sind minimal
- Die durch die Energiegewinnung verursachten Stoffflüsse sind deutlich kleiner

Als Zwischenschritt bis 2050 gelten folgende Ziele:

- Wärme in Gebäuden: ohne fossile Brennstoffe
- Energie in Gebäuden: Halbierung des Verbrauchs
- Energie aus Biomasse: Nutzung verdreifachen
- Treibstoffverbrauch von Personenzug: drei Liter auf 100 km (mittlerer Flottenverbrauch)

### 3.2.3 Gesetze und Verordnungen

Massgebend für die Entwicklung von Verbrennungssystemen sind die Vorschriften über die zulässigen Abgas-Emissionen. Hinzu kommen Vorgaben über den Treibstoffverbrauch insbesondere für Automobile. In der Schweiz werden die zulässigen Emissionen an Luftfremdstoffen in der Luftreinhalteverordnung geregelt [7] Die Verordnung wird laufend angepasst. Für die Begrenzung der Abgasemissionen von Motorfahrzeugen und Maschinen setzt die Schweiz die Vorschriften der Europäischen Union ein [11]. Es gilt zu berücksichtigen, dass es für verschiedene Fahrzeugkategorien und Einsatzgebiete sehr unterschiedliche Vorschriften gibt. Hinzu kommt, dass die Grenzwerte in verschiedenen Bezugsgrössen angegeben werden. So werden die Grenzwerte bei Personenzug und leichten Nutzfahrzeugen in g/km und bei schweren Motorfahrzeugen in g/kWh angegeben.

Massgebende internationale Vorschriften sind die vorgenannten Normen der EU (Euro 1 – 6) die EPA Tier in den USA [12] und die Emission Standards in Japan [13]. Hinzu kommen verschärfte lokale Vorschriften wie beispielsweise in Kalifornien [14] oder auch in einzelnen Kantonen der Schweiz. Für die Schifffahrt in internationalen Gewässern setzt die International Maritime Organisation (IMO) als Agentur der Vereinten Nationen [15] Standards fest. Für die Motorenentwickler, die sich auf einem internationalen Markt behaupten müssen ist die Situation komplex und bedarf der sorgfältigen Abklärung und Planung.

Im Zusammenhang mit der Diskussion über die Auswirkungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf den Treibhauseffekt und unser Klima werden beispielsweise in der EU und in Japan auch Verbrauchsvorschriften erlassen-

Land/ Vorschrift	CO g/km	CO g/kWh	NOx g/km	NOx g/kWh	Partikel g/km	Partikel g/kWh
<i>Fahrzeugtyp</i>	<i>PW</i>	<i>LKW</i>	<i>PW</i>	<i>LKW</i>	<i>PW</i>	<i>LKW</i>
Schweiz/ EU (Euro 4)	0.50	4.00	0.25	3.5	0.025	0.03
Euro 6 (ab 2014)	0.50	4.00	0.08	0.4	0.005	0.01
USA Tier 2 ab 2004	2.5	20.7	0.37	2.7	0.049	0.067
USA Tier 2 ab 2009	2.5	20.7	0.04	0.27	0.006	0.013
Japan 2005	0.63	2.22	0.15	2.0	0.014	0.18
Japan 2009	0.63	2.22	0.08	0.7	0.005	0.027

Fig.18: Übersicht aktueller Emissionsvorschriften (Die Messungen erfolgen tw. auf Basis unterschiedlicher Fahrzyklen, dies hat einen Einfluss auf den Grenzwert!)

## 4. Nationale Akteure

In der Schweiz sind Motoren- und Gasturbinenhersteller, Heizkessel- und Brennerproduzenten, Zulieferer von Komponenten und Systemen für die Verbrennungsindustrie sowie Entwicklungszentrum von grossen europäischen Herstellern mit rund 5000 Mitarbeitern aktiv. Hinzu kommen die Forschungsinstitutionen des ETH-Bereichs sowie von zahlreichen Fachhochschulen.

Die Akteure sind im Hochschulforschungsbereich gut vernetzt und pflegen Kontakte zur Industrie. Insgesamt ist die Vernetzung der nationalen Akteure jedoch verbesserungsfähig. Die folgende Zusammenstellung deckt nur einen Teilbereich ab. Eine Vervollständigung der Übersicht soll eine Aufgabe im Programm 2008 -11 sein.

### 4.1 Forschungsinstitute der Hochschulen (nicht abschliessend)

Organisation/Institut	Wichtige Tätigkeitsgebiet	Internetadresse
ETHZ / DMAVT / IET / LAV: Laboratorium für Aerothermochemie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbrennungssysteme von Motoren und Turbinen</li> <li>- Einspritzsysteme</li> <li>- Numerische Simulation (CFD, CRFD, LES, LB)</li> <li>- Messsysteme</li> <li>- Versuchsträger</li> </ul>	<a href="http://www.lav.ethz.ch">www.lav.ethz.ch</a>
ETHZ / DMAVT / IMRT Institut für Mess- und Regelungstechnik Thermotronik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Messung und Regelung von Verbrennungssystemen</li> <li>- Dieselmotoren, Ottomotoren, Gasturbinen</li> </ul>	<a href="http://www.imrt.ethz.ch">www.imrt.ethz.ch</a>
ETHZ / DMAVT / IET Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Thermodynamik in Verbrennungssystemen für Motoren und Gasturbinen</li> <li>- Numerische Simulation</li> </ul>	<a href="http://www.ltnt.ethz.ch">www.ltnt.ethz.ch</a>
EPFL Faculté STI ISE Institut des Sciences de l'Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbrennung in Gasmotoren mit verschiedenen Brennstoffen (Erdgas, Biogas, Wasserstoff)</li> <li>- Prüfstand</li> <li>- numerische Simulation der Gasströmung und Verbrennung</li> </ul>	<a href="http://www.ise.epfl.ch">www.ise.epfl.ch</a>
EMPA Departement Mobilität, Energie und Umwelt Abt. Verbrennungsmotoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbrennungsforschung an Diesel-, Benzin- und Gasmotoren für PKW und Nutzfahrzeuge</li> <li>- Abgasnachbehandlung</li> <li>- Abgas- und Katalysatormodellierung</li> <li>- Partikelanalytik und Russbildung</li> </ul>	<a href="http://www.empa.ch">www.empa.ch</a>
PSI (Paul Scherrer Institut) Forschungsbereich allg. Energie, Verbrennungsforschung (LVF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- turbulente magere vorgemischte Verbrennung</li> <li>- katalytische Verbrennung</li> <li>- Laser Diagnose</li> <li>- molekulare Dynamic</li> <li>- Abgasbehandlung</li> <li>- Messeinrichtungen</li> <li>- versch. Versuchsträger</li> </ul>	<a href="http://www.crl.web.psi.ch">www.crl.web.psi.ch</a>
Berner Fachhochschule für Technik und Informatik Abgasprüfstelle und Motorenlabors Biel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbrennungsmotoren Einspritzsysteme, Verbrennung Aufladung, Abgasnachbehandlung</li> <li>- Partikelfilter, deNO<sub>x</sub>-Systeme</li> <li>- Motor- und Fahrzeugprüfstände</li> <li>- Abgasprüfstelle</li> </ul>	<a href="http://www.afhb.bfh.ch">www.afhb.bfh.ch</a>
Berner Fachhochschule Schweizer Hochschule für Landwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bewirtschaftung und Produktion von Rapsöl</li> <li>- Adaption von Verbrennungsmotoren für Rapsöl</li> </ul>	<a href="http://www.shl.bfh.ch">www.shl.bfh.ch</a>

Fachhochschule Nordwestschweiz Institut für Thermo- und Fluid Engineering	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbrennungskonzepte für Gasturbinen mit Syngas, Wasserstoff etc.</li> <li>- Verbrennung in Ölheizkesseln (mit Vorverdampfer)</li> <li>- Prüfstelle für Holzfeuerungen</li> </ul>	<a href="http://www.fhnw.ch/technik/itfe">www.fhnw.ch/technik/itfe</a>
Weitere Fachhochschulen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecole d'Ingenieur de Genève</li> <li>• Hochschule für Technik u. Architektur, Freiburg</li> <li>• Haute Ecole Arc ingenierie St. Immier</li> <li>• Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD)</li> <li>• Hochschule für Technik, Rapperswil</li> <li>• Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, Winterthur</li> <li>• NTB Interstaatliche Hochschule für Technik, Buchs</li> </ul>	Vertreter dieser Fachhochschulen tauschen ihre Erfahrungen zu Themen der Verbrennungsforschung in der HKV Hochschulkompetenzgruppe Verbrennung aus.	<a href="http://www.eig.ch">www.eig.ch</a> <a href="http://www.eia-fr.ch">www.eia-fr.ch</a>  <a href="http://www.he-arc.ch">www.he-arc.ch</a>  <a href="http://www.heig-vd.ch">www.heig-vd.ch</a>  <a href="http://www.hsr.ch">www.hsr.ch</a>  <a href="http://www.zhaw.ch">www.zhaw.ch</a>  <a href="http://www.ntb.ch">www.ntb.ch</a>

#### 4.2 Industrie, Hersteller (Übersicht wichtiger Akteure, nicht abschliessend)

Unternehmen	Wichtige Tätigkeitsgebiete	Internetadresse
ABB Turbo Systems	Hersteller von Turboladern; insbesondere für Grossdieselmotoren	<a href="http://www.abb.com">www.abb.com</a>
Alstom (Schweiz) AG, Baden (5000 Mitarbeitende in CH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung und Herstellung von grossen Gasturbinen (GT 24 mit 188 MW GT 26 mit 288 MW)</li> </ul>	<a href="http://www.alstom.com">www.alstom.com</a>
DUAP AG, Herzogenbuchsee	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung und Herstellung von Einspritzsystemen für Dieselmotoren (mittlere bis grosse)</li> </ul>	<a href="http://www.duap.ch">www.duap.ch</a>
Hug Engineering	Abgasbehandlungssysteme	<a href="http://www.hugengineering.ch">www.hugengineering.ch</a>
Innomot AG, Knutwil	Hüttlin Kugelmotor (Finanzgesellschaft; Entwicklung in Lörrach)	<a href="http://www.innomot.com">www.innomot.com</a>
Iveco Motorenforschung AG, Arbon (ehemals Firma Saurer) 120 Mitarbeiter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklungszentrum von Dieselmotoren für Nutzfahrzeuge, Baumaschinen, Schiffsmotoren</li> </ul>	<a href="http://www.iveco-arbon.ch">www.iveco-arbon.ch</a>
Kistler Instrumente AG, Winterthur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung und Herstellung von Messsonden und -systeme für Verbrennungsmotoren</li> <li>• Entwicklung und Herstellung für andere Anwendungsgebiete</li> </ul>	<a href="http://www.kistler.com">www.kistler.com</a>
Liebherr Machines Bulle SA 600 Mitarbeitende in CH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung und Herstellung von Hochleistungsdieselmotoren für Baumaschinen</li> </ul>	<a href="http://www.liebherr.com">www.liebherr.com</a>
Peraves AG, Winterthur	- Kugelmotor; Applikation in Motorrad	<a href="http://www.peraves.ch">www.peraves.ch</a>
SWISSauto Wenko AG, Burgdorf	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konstruktion und Herstellung von Verbrennungsmotoren (Otto)</li> <li>• Entwicklung von Aufladeaggregaten</li> </ul>	<a href="http://www.wenko.ch">www.wenko.ch</a>

Toby AG, Solothurn	Spezielle Brenner und Geräte für Ölheizungen	<a href="http://www.toby.ch">www.toby.ch</a>
Wärtsilä Schweiz AG (ehemals Sulzer Diesel) 450 Mitarbeitende in CH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklungszentrum für 2-Takt Grossdieselmotoren bis 85'000 kW</li> <li>• Herstellung weltweit unter Lizenzvergabe</li> <li>• Motorenprüfstand für die Entwicklung</li> <li>• Zylinderblock mit optischen Zugängen für Optimierung Einspritzsystem und Verbrennung</li> </ul>	<a href="http://www.wartsila.com">www.wartsila.com</a>
Verschiedene Heizgeräte-Hersteller in der Schweiz	Teilweise werden Entwicklungen in der Schweiz durchgeführt	

#### 4.3 Ingenieurbüros und Berater (Übersicht einiger Akteure, nicht abschliessend)

Fuchs Engineering GmbH Landquart	Engineering, CAD auch für Motoren	<a href="http://www.fuchs-engineering.ch">www.fuchs-engineering.ch</a>
Oekozentrum Langenbruck	Forschung und Entwicklung verschiedener Systeme, Beratung, Planung	<a href="http://www.oekozentrum.ch">www.oekozentrum.ch</a>
TTM Mayer Niederrohrdorf	Abgasbehandlung, Partikelfilter Konferenz Nanoparticles	-
Wagner INOVTEC Bern	Entwicklung und Weiterentwicklung in der Automobiltechnik	-

#### 4.4 Förderinstitutionen (Übersicht wichtiger Akteure, nicht abschliessend)

BFE Bundesamt für Energie Andere Bundesämter	Förderung der Energieforschung	<a href="http://www.bfe.admin.ch">www.bfe.admin.ch</a>
CCEM Kompetenzzentrum für Energie und Mobilität	Förderstelle für den ETH Bereich	<a href="http://ccem-ch.web.psi.ch">ccem-ch.web.psi.ch</a>
FEV Forschungsfonds der Erdöl-Vereinigung	Förderstelle der Erdölvereinigung	<a href="http://www.erdoelvereinigung.ch">www.erdoelvereinigung.ch</a>
FOGA Verband der Schweizerischen Gasindustrie	Förderstelle der Gasindustrie	<a href="http://www.erdgas.ch">www.erdgas.ch</a>
KTI (Kommission für Technische Innovation) Förderagentur für Innovation des Bundes	Förderung marktnaher Forschung	<a href="http://www.kti-cti.ch">www.kti-cti.ch</a>
SBF Staatssekretariat für Bildung und Forschung	Finanzierung im Zusammenhang mit EU-Projekten	<a href="http://www.sbf.admin.ch">www.sbf.admin.ch</a>
SNF Schweizer Nationalfonds	Bundesgelder für Grundlagenforschung	<a href="http://www.snf.ch">www.snf.ch</a>
Swisselectric Research	Förderstelle der Stromversorger	<a href="http://www.swisselectric-research.ch">www.swisselectric-research.ch</a>

#### 4.5 Verbände, Vereinigungen (Übersicht, nicht abschliessend)

Schweiz Vereinigung Verbrennungsforschung (SVV). Die Vereinigung wird von Prof. K. Boulouchos (LAV ETHZ) und Dr. P. Jansohn (PSI) betreut und trifft sich in der Regel jährlich zu einer Tagung Verbrennungsforschung in der Schweiz. ( <a href="http://www.lav.ethz.ch">www.lav.ethz.ch</a> )
Hochschulkompetenzgruppe Verbrennungsmotoren (HKV). Die Gruppe trifft sich jährlich zu einem Informationsaustausch. Hauptsächlich nehmen daran Vertreter der Fachhochschulen teil. Die Gruppe wird von Prof. J. Czerwinski der Berner Fachhochschule für Technik und Informatik TI, Biel betreut. ( <a href="http://www.afhb.bfh.ch">www.afhb.bfh.ch</a> )
European Research Community On Flow, Turbulance And Combustion (Ercoftac) hat ihren Sitz an der Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne (EPFL). Der Fokus im Bereich Verbrennung richtet sich auf strömungsrelevante Themen. Numerische Rechenmodelle sind grundlegende Forschungsthemen der europäisch ausgerichteten Gruppe. ( <a href="http://www.ercoftac.org">www.ercoftac.org</a> )
Verband Schweizer Maschinen-, Elektro- und Metall-Industrie (Swissmem) Fachgruppe Verbrennungsmaschinen ( <a href="http://www.swissmem.ch">www.swissmem.ch</a> )
Society of Automotive Engineers Schweiz (SAE Switzerland; <a href="http://www.sae-switzerland.ch">www.sae-switzerland.ch</a> )
Erdöl-Vereinigung, Verband der Erdölwirtschaft in der Schweiz ( <a href="http://erdoel-vereinigung.ch">erdoel-vereinigung.ch</a> )
Verband der Schweizerischen Gasindustrie (VSG; <a href="http://www.vsg.ch">www.vsg.ch</a> )

### 5. Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Vernetzung der Verbrennungsforschung ermöglicht den Forschenden der Schweiz an länderübergreifenden Projekten und Programmen teilzunehmen und sich zu messen. In zahlreichen Gebieten wird dies erfolgreich wahrgenommen.

Ein wichtiger internationaler Erfahrungsaustausch erfolgt im Technology Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion der Internationalen Energie Agentur (IEA) [16]. Das Ziel dieser Gruppe ist, die Entwicklung von Verbrennungstechnologien, die einen verminderten Treibstoffverbrauch und geringere Partikelemissionen aufweisen, für industrielle Anwendungen voranzutreiben. Die Forschungsschwerpunkte umfassen: (1) Die Verbesserung der Effizienz und der Treibstoffflexibilität von Verbrennungsmotoren für Autos und Lastwagen; (2) Die Reduktion des Luftüberschusses in Feuerungen zur Erhöhung des Wirkungsgrads bei minimalen Emissionen; (3) Kontrollmechanismen der Treibstoffeinspritzung und Gemischbildung sowie der Entstehung der Emissionen in Brennkammern von Gasturbinen und (4) Untersuchungen von grundlegenden physikalischen Phänomenen im Verbrennungsprozess. Als eine der Haupterfolge ist die Entwicklung von robusten diagnostischen Fähigkeiten zu werten, wie z.B. Laser induced fluorescence, verbesserte Computational fluid dynamics und Chemical kinetics codes. Die Forschungsthemen werden in sogenannten Collaborative tasks bearbeitet. Aktuell werden in sechs Tasks die Themen Advanced Hydrogen fueled Internal Combustion Engines, Homogeneous Charge Compression Ignition, Gas Turbines, Sprays, Alternative Fuels und Nanoparticle Diagnostics bearbeitet. Weitere Collaborative Tasks wie Soot Formation und Energy Security sind vorgesehen. Das BFE ist Mitglied im Executive Committee und Forscher des PSI und der ETH wirken in Projekten mit.

Das BFE ist zudem in der Working Party for Fossil Fuels der IEA [17] vertreten. Arbeitsgebiete dieser Gruppe sind Vorkommen, Gewinnung und Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie die Elimination und Entsorgung von CO<sub>2</sub> (CCS Carbon Capture and Storage).

Das Combustion Institut mit Sitz in Pittsburg ist eine Akademie der Wissenschaften mit dem Zweck die Forschung im gesamten Bereich der technischen Verbrennung sowie die Pflege internationaler wissenschaftlicher Kontakte zu fördern. Alle zwei Jahre wird das International Symposium on Combustion durchgeführt, an dem Wissenschaftler und Forschende über den Stand der universitären Verbrennungsforschung berichten. Verschiedene vom BFE geförderte Projekte wurden bisher zur Präsentation akzeptiert und konnten damit einem internationalen Fachpublikum vorgestellt werden.

Auf europäischer Ebene ist die Bearbeitung eines Teilprojekts im von der EU (FP6 und FP 7) und dem BFE mitfinanzierten Projekt HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships) [18] ein wichtiger Meilenstein in der internationalen Zusammenarbeit zwischen Hochschulen und der Industrie. Schweizer Beteiligte sind Wärtsilä Schweiz AG (Hersteller von grossen Zweitakt Dieselmotoren für Schiffsantrieb), ABB Turbosystems, das LAV der ETHZ, das PSI und die EMPA.

Die vorwiegend mit Mitteln der Industrie finanzierten Projekte der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschine FVV werden international ausgeschrieben und im Wettbewerb zu anderen Universitäten und Forschungsinstitutionen vergeben. Das Laboratorium für Aerothermochemie der ETHZ erhielt bereits verschiedene Forschungsaufträge der FVV den Zuschlag und wurde dabei vom BFE finanziell unterstützt.

## **6. Technische und wirtschaftliche Zielsetzungen**

Die Zielsetzungen der Verbrennungsforschung für die Aktivitäten in der Periode 2008 - 11 orientieren sich an den Vorgaben und den Erkenntnissen aus den Zielsetzungen des Bundes, der Analyse der Umssysteme sowie dem Stand der Technik. Hinzu kommen organisatorische Ziele, die für die Abwicklung des Forschungsprogramms und die Vernetzung der Akteure relevant sind.

### **6.1 Technische Ziele**

Durch die klimarelevante Problematik des insbesondere durch den zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoss aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern verursachten Treibhauseffekts, stehen die Verbrennungssysteme besonders in der Kritik. Die Forderung nach der Reduktion der (weltweiten) CO<sub>2</sub>-Emissionen umfasst verschiedene Massnahmenbereiche. Dazu gehört die Reduktion des Energieverbrauchs durch Einsparungen, der Einsatz CO<sub>2</sub>-neutraler Energieträger für die Nutzenergieerzeugung durch Verbrennung, die Elimination des CO<sub>2</sub> vor oder nach der Verbrennung von fossilen Energieträgern und die langfristige Speicherung im Untergrund o.ä. sowie die Reduktion des spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstosses von Verbrennungssystemen. Aufgrund der grossen und bestens etablierten Verbreitung von Verbrennungssystemen mit fossilen Energieträgern wird der Wechsel auf andere Systeme oder Energieträger längere Zeit in Anspruch nehmen. Neben der Verminderung der Energienachfrage - wie beispielsweise durch Gebäudeisolation oder Senkung des Fahrzeuggewichts - kann durch die Reduktion des spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstosses von Motoren, Gasturbinen Heiz- oder Dampfkesseln, ein wesentlicher Beitrag zur Minderung des Treibhauseffekts erzielt werden.

#### ***Verbesserte Forschungsmethoden und -instrumente***

Entsprechend dem hohen Stand der Technik und den laufend geforderten Verbesserungen der Verbrennungssysteme sind die Anforderungen an die Instrumente und die Vorgehensweisen in der Verbrennungsforschung gross. Die Grundlagen und Methoden der Forschung sind deshalb stetig anzupassen und zu verbessern. Um die unterschiedlichen Funktionsweisen und Einflussfaktoren der chemischen, thermodynamischen und kinetischen Prozesse in der Verbrennung zu verstehen und entsprechende Veränderungen zu bestimmen, genügen rein empirische Vorgehensweisen nicht. Hilfreich sind Instrumente wie die numerische Modellierung der Prozesse, Versuchsträger - um beispielsweise Teilbereich der motorischen Verbrennung zu untersuchen - und geeignete Messmethoden. Die Verbesserung der Forschungsmethoden und -instrumente hat auch immer einen Bezug zu den wirkungsorientierten Zielen der Verbrennungsforschung: Erhöhung des Systemwirkungsgrads, Reduktion der Schadstoffemissionen sowie Nutzung verschiedener Energieträger.

#### ***Erhöhung des (System-) Wirkungsgrades***

Mit einem höheren Wirkungsgrad der Energieumwandlung lässt sich der Verbrauch an Energieträgern reduzieren womit auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoss gesenkt wird. Bei steigenden Energiepreisen wird die Verbesserung des Wirkungsgrads auch aus ökonomischen Gründen gefordert und es können aufwändigere bzw. teure Systeme entwickelt werden. Bei im transienten Betrieb eingesetzten Systemen sind die unterschiedlichen Last- bzw. Betriebszustände in die Betrachtungen mit ein zu beziehen. Dies gilt beispielsweise für Verbrennungsmotoren im mobilen Einsatz. Generell ist davon auszugehen, dass die Technologie der konventionellen Systeme wie Diesel-, Benzinmotor oder Gasturbine bereits auf einem hohen Niveau steht und weitere Verbesserungen besonderer Anstrengungen bedürfen. Die Kombination mit anderen Energiesystemen - wie beispielsweise die Wärmepumpe - erlaubt für den Bereich der Gebäudebeheizung verbesserte Gesamtwirkungsgrade. Im Leistungsbereich unter 100 kW fehlen entsprechende Motoren, die den gestiegenen Anforderungen genügen.

#### ***Reduktion der Schadstoffemissionen***

Durch die zunehmende Verschärfung der Grenzwerte für Schadstoffemissionen müssen die Verbrennungssysteme weiter verbessert werden. Neben den Schadstoffen NO<sub>x</sub>, HC und CO sind die Russpartikel (Feinstaub, Nanopartikel) zunehmend im Fokus der Forderungen nach Emissionsreduktion. Massnahmen zur Vermeidung der Schadstoffbildung wirken sich teilweise gegenteilig auf einzelne Schadstoffe aus. So bewirken innermotorische Vermeidungsstrategien für NO<sub>x</sub> eine Zunahme der Russbildung (sowie eine Verminderung des Wirkungsgrades). Massnahmen in der Brennstoffzusammensetzung sowie der Abgasnachbehandlung müssen in die Betrachtungen mit einbezogen werden.

### **Nutzung verschiedener Energieträger; vor allem auch biogene**

Der Einsatz von biogenen Treibstoffen erfolgte bisher vor allem durch die empirische Adaption von konventionellen Verbrennungssystemen. Die theoretischen Grundlagen, wie beispielsweise die Berechnungsmodelle der numerischen Simulation, sind noch wenig angepasst und mit Versuchen validiert. Gleiches gilt für neue Brennstoffe, die mit geänderter Zusammensetzung, wie beispielsweise dem Zusatz von H<sub>2</sub>, eingesetzt werden sollen.

Zusammenfassend lassen sich die technischen Ziele für die Forschung wie folgt quantifizieren. Diese nehmen die zu erwartenden gesetzlichen Werte um einige Jahre vorweg.

Verbrennungssystem	Stoff Faktor	Einheit	2008/09 LRV bzw. Euro 5	2010	2015	2020
Stat. Gasmotor >100 kW	NOx	mg/Nm <sup>3</sup> bei 5% O <sub>2</sub>	400	2	1	0.5
	CO	mg/Nm <sup>3</sup> bei 5% O <sub>2</sub>	650	20	5	2
	η	%		42	45	50
Stat. Gasmotor 10 kW	NOx	mg/Nm <sup>3</sup> bei 5% O <sub>2</sub>	k.a.	10	5	2
	CO	mg/Nm <sup>3</sup> bei 5% O <sub>2</sub>	k.a.	100	50	20
	η	%		30	33	35
Leichte Fz (PW): - Diesel:  - Otto (Benzin/Gas)  - Hybrid (D, B, G)	NOx	g/km	0.18	0.1	0.05	0.02
	Russ (PM)	mg/km	5.0	5.0	2.0	1.0
	η	%		17-31	19-32	23-35
	NOx	g/km	0.06	0.06	0.04	0.02
	Russ (PM)	mg/km	5.0	5.0	2.0	1.0
	η	%		10-30	12-31	16-34
	NOx	g/km		0.06	0.06	0.02
	η	%		17-30	19-32	23-35
	Schwere Fz (LKW, Bus): - Diesel:  - Otto (Gas, Ethanol)	NOx	g/kWh	2.0	1.0	0.2
Russ (PM)		g/kWh	0.02	0.01	0.005	0.002
η <sub>Fahrzykl</sub>		%		38	41	45
NOx		g/kWh	2.0	1.0	0.2	0.1
Russ (PM)		g/kWh	-		0.005	0.002
η		%		ca. 30	ca. 32	ca. 35

Fig. 19: Kennzahlen zur angestrebten Technologieentwicklung für Diesel- und Gasmotoren

## **6.2 Wirtschaftliche Ziele**

### **Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit der Systeme für biogene Energieträger**

Die Konkurrenzfähigkeit von Anlagen für biogene Energieträger hängt von der Preisrelation zu den fossilen Energieträgern und den Kosten für die Anpassung des Verbrennungssystems ab. Die Anpassungskosten werden durch die Stückzahl aber auch den erforderlichen Umfang der Anpassung bestimmt. Mit einer wissensbasierten Konzipierung der notwendigen Zusatzkomponenten können die Grundkosten der Systeme reduziert werden. Das Erreichen der notwendigen Stückzahlen für die kosten sparende Serienproduktion wird dadurch zumindest unterstützt.

### **Kostenreduktion für die Entwicklung verbesserter Verbrennungssysteme**

Um die vorgenannten technischen Ziele zu erreichen, sind grosse Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erforderlich. Mit robusten Berechnungsmodellen können Vorschläge zur Verbesserung vorgeprüft und erst die erfolgsversprechenden in den konkreten Versuchsanlagen getestet werden. Zudem lassen sich Einflussfaktoren erkennen und die Lösungssuche miteinbeziehen. Die laufende Verbesserung der Modelle und Codes für die numerische Simulation entspricht somit nicht nur den technischen Zielsetzungen, sondern ist auch wirtschaftlich relevant.

### 6.3 Organisatorische Zielsetzungen

#### ***Hohe Kompetenz in den Fachgruppen***

In ausgewählten Themen weisen die Schweizer Forschenden einen von der Industrie auch international sowie in den führenden Forschungsinstitutionen anerkannten hohen Stand auf. Um die Kompetenz zu halten und weiter zu entwickeln sind die vorhandenen Mittel des Bundes, unter Berücksichtigung der vorgenannten technischen und wirtschaftlichen Zielsetzungen, gezielt einzusetzen. Die Unterstützung von neuen Themen und Gruppen ist deshalb sorgfältig zu prüfen.

#### ***Gute Vernetzung von Forschenden und Industrie***

Das Ziel von produktorientierter Forschungsarbeit ist die Umsetzung in marktfähige Produkte. Gute Kontakte zwischen den Forschungsinstitutionen und der Industrie - im Idealfall mit gemeinsamen Projekten - ist deshalb notwendig. Mit geänderten oder neuen Forschungsschwerpunkten müssen die Netzwerke ausgebaut oder geändert werden. Die Forderung zur verstärkten Nutzung von biogenen Brennstoffen erfordert beispielsweise auch den Miteinbezug der Brennstoffproduzenten.

#### ***Hohe Wirkung der internationalen Zusammenarbeit***

Die Verbrennungstechnologie ist von der Forschung über die Herstellung bis zur Anwendung ein ausgeprägtes internationales Geschäft. Das erfordert einerseits den internationalen Wissensaustausch und den Wissenswettbewerb. Andererseits besteht auch die Möglichkeit, durch Einflussnahme in internationalen Gremien, den Zielsetzungen des Bundes Nachachtung zu verschaffen und gezielt Forschungsprojekte zu initiieren und mitzugestalten. Dies ist beispielsweise durch die Mitarbeit in der internationalen Energieagentur gelungen.

#### ***Einbezug der Fachhochschulen und der Industrie in Forschungsprojekte***

Wie aus der Auflistung der Akteure in der Verbrennungsforschung ersichtlich ist, beschäftigen sich auch zahlreiche Fachhochschulen mit dem Thema. Die angewandte Forschung ist in der Regel marktnah und setzt die Zusammenarbeit mit Industriepartnern voraus. Dieser Aspekt sollte in Zukunft in der Projektevaluation stärker berücksichtigt werden.

#### ***Verbessern der Kommunikation***

Die Verbesserung der Kommunikation wird bereits durch verschiedene übergeordnete Vorgaben des BFE gefordert. (Subsite für Forschungsprogramm, Success Stories, Infobroschüre über Energieforschung). Darüber hinaus sollte in Abstimmung mit den Projektpartnern die interne und externe Kommunikation verbessert werden.

#### ***Verbessern der programmübergreifenden Kommunikation und Kooperation***

Die Verbrennungsforschung ist eine Querschnittstechnologie (Fig. 9) und dient auch in anderen Forschungsprogrammen als Kern der Energieumwandlung. Dazu gehören Biomasse, WKK, KW2020, CCS und Verkehr. Durch einen verstärkten Informationsaustausch sollten Kooperationen auch von Projektteilnehmern frühzeitig geprüft werden.

## 7. Mitteleinsatz für die Verbrennungsforschung

### **ÖFFENTLICHE HAND**

Mitteleinsatz des Bundes: CHF 11 Mio.

Mitteleinsatz der Kantone: nicht bekannt

### **PRIVATWIRTSCHAFT**

Mitteleinsatz der Industrie und privater Förderinstitutionen: CHF 200 Mio. (grobe Schätzung).

## 8. Forschungsschwerpunkte in den Jahren 2008 – 2011

Die Bestimmung der Schwerpunkte stützt sich auf die Zielsetzung aus Kapitel 6, die Erkenntnisse der Situationsanalyse in Kapitel 3, die für Forschungsprojekte einsetzbare Schweizer Akteure in Kapitel 4 sowie das Ziel der Kontinuität respektive die Forschung und Weiterentwicklung von bestehendem und durchs BFE mitfinanziertem Wissen.

### SCHWERPUNKT 1:

#### Weiterentwicklung der Forschungsmethoden und –instrumente für konventionelle und für biogene Energieträger

Ziele:

- Kompetenzen in den Fachgruppen halten und erweitern
- Kontinuität in der Entwicklung numerischer Simulationsmodelle
- Verbesserung der physikalischen Grundlagen der Verbrennungsforschung
- Anpassung respektive Erweiterung der Instrumente für die Verbrennungsforschung für biogene und neue zusammengesetzte Brennstoffe
- Verstärkte Nutzung von Synergien durch kombinierte experimentelle und numerische Forschung

Diese Ziele führen zu einer Kostenreduktion und Beschleunigung der Forschung durch effiziente und Zeit ersparende Instrumente anstelle teurerer Experimente.

Kommentar: Mit der Unterstützung der Weiterentwicklung von bestehenden Forschungsinstrumenten werden neben den technischen Zielsetzungen auch organisatorische unterstützt: Den Forschergruppen wird ermöglicht ihr Wissen zu aktualisieren und an die neuen Gegebenheiten anzupassen; die Kompetenz wird erhalten und gestärkt.

Akteure:

- ETH-Bereich mit hohem Wissensstand in CFD, transiente Motoren- und Strömungsprüfstände sowie Ressourcen für die Erforschung der physikalischen Grundlagen (LAV ETHZ, PSI, Empa)
- Fachhochschulen mit entsprechendem umsetzungsorientiertem Know How
- Industrie mit eigenen Versuchsträgern für die Erforschung von den BFE-Zielen entsprechenden Verbesserungen (z.B. Wärtsilä Projekt Hercules)

Mittleinsatz: 30 %

Projektideen:

- Weiterentwicklung numerischer Simulationsmodelle (Schwerpunkt CRFD) für den Einsatz in der Entwicklung, Optimierung und Diagnose von neuen Verbrennungssystemen, von verbesserungsbedürftigen Grundlagen bis hin zu Anwendungen
- Weiterentwicklung der Kenntnisse über die physikalischen Vorgänge und die Energiefreisetzung während dem Zündvorgang als verbesserte Grundlagen für die numerische Simulation
- Weiterentwicklung von Versuchsträgern auch für den Einsatz von biogenen Energieträgern

### SCHWERPUNKT 2:

#### Verbesserung und stärkere Vernetzung der experimentellen und numerischen Methoden für die Optimierung des Gesamtsystems „Motor“ umfassend die Prozesskette Gemischbildung – Zündung - Verbrennung - Abgasnachbehandlung

Ziele:

- Reduktion der Schadstoffemissionen
- Halten und Verbessern des Gesamtwirkungsgrads trotz Massnahmen zur Schadstoffreduktion
- Gewährleisten von Schadstoffreduktion und Wirkungsgrad auch im transienten Betrieb
- Anpassung der Systeme für biogene Brennstoffe und Gemische
- Weiterentwicklung der experimentelle und numerischen Forschung in Richtung neuer Brennverfahren (z.B. Downsizing, vollvariable Ventiltriebe, HCCI)

Kommentar Entsprechend den bekannten Abhängigkeiten in der Prozesskette Gemischbildung bis zur Abgasnachbehandlung ist in den Experimenten und den numerischen Methoden und schlussendlich im realen System eine Gesamtbetrachtung notwendig. Die Schnittstellen müssen bekannt sein und die gegenseitige Beeinflussung durch Veränderungen in einem Teilprozess berücksichtigt werden. Dies gilt für die Entwicklung von Verbrennungssystemen wie auch für die realen Systeme. Beispielsweise können in situ erkannte Veränderungen im Brennraum eine rasche Anpassung der Abgasbehandlung sowie die Veränderung der Gemischaufbereitung erfordern.

Akteure: - ETH-Bereich insbesondere LAV ETHZ und EMPA  
- Fachhochschulen insbesondere AFHB  
- Industrie u.a. Fa. Kistler  
- Motorenindustrie resp. -forschungszenter

Mittleinsatz: 25 %

Projektideen: - Integration der Erkenntnisse aus experimentellen Grundlagenprojekten (Laserdagnostik) in die Entwicklung miniaturisierter, nicht-invasiver Sensoren für den realen Einsatz in Verbrennungsmaschinen.  
- Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren zur Darstellung und Steuerung der Schnittstelle von der Verbrennung zur Abgasbehandlung

### SCHWERPUNKT 3

**Darstellung von „Null-Emission-Systemen“ für die kleinskalige (10 kW bis 100 kW) kombinierte Strom-Wärme-Kälte-Erzeugung (inkl. Wärmepumpen und Biomasse) und für PW-Antriebe.**

Ziele: - Erhöhung der Effizienz von verbrennungsbasierten Systemen zur Beheizung oder Kühlung von Gebäuden bzw. Antrieb von Fahrzeugen  
- Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses der vorgenannten Systeme  
- Reduktion der Schadstoffemission der vorgenannten Systeme  
- Beitrag zur Stromproduktion  
- Nutzung von know how aus grösseren Motoren (Swissmotor)

Kommentar: Mit der kombinierten Kraft und Wärmeerzeugung resp. Wärmenutzung, werden hochwertige Brennstoffe besser genutzt als bei der reinen Wärmeerzeugung mit Heizkesseln. In der Kombination mit Wärmepumpen fällt die Bilanz der Schadstoffemissionen, insbesondere auch von CO<sub>2</sub>, erheblich besser aus als bei reiner Heizkesselwärme. Im unteren Leistungsbereich gibt es jedoch nur wenige Hersteller verbrennungsbasierter Energiewandler, die sich für den Einsatz als Klein-BHKW oder für den Antrieb von Wärmepumpen eignen. Bezüglich des Wirkungsgrads hat der Verbrennungsmotor Vorteile, bei kleinskaligen Systemen sind jedoch noch Verbesserungen notwendig. Zudem sollten die Emissionen weiter reduziert werden. Basisarbeiten sollten mit bekannten Brennstoffen wie Erdgas und in Anlehnung an den Swissmotor bzw. das Clean Engine Vehicle-Projekt erfolgen. Die Anwendung mit biogenen Brennstoffen (Biodiesel, Ethanol, Wasserstoff) sind noch wenig erforscht und umgesetzt.

Akteure: - ETH-Bereich mit Erfahrungen in der Konzipierung von Verbrennungsmotoren mit extrem tiefen Emissionen (Swissmotor, Clean Engine Vehicle)  
- Fachhochschule für Erprobung Gesamtsysteme  
- Know How Träger von Gasmotoren  
- Motorenhersteller (Kleinmotoren 10 - 100 kW)  
- Eventuell Zusammenarbeit mit Herstellern von Wärmepumpen oder von BHKW's  
- Eventuell Kooperation mit FP Wärmepumpen und WKK

Mittleinsatz: 20 %

Projektideen: - Evaluation geeigneter kleinskaliger Verbrennungsmotoren für die Verbesserung des Emissionsverhaltens  
- Teilprojekte für die Optimierung von Gasmotoren bis hin zum Gesamtsystem

- Adaption der emissionsoptimierten Motoren für die Nutzung mit biogenen Brennstoffen
- Versuchsanlage mit Kombination Stromproduktion (Generator) und/oder Wärmepumpe; eventuell P+D-Projekt

#### **SCHWERPUNKT 4:**

##### **Optimierung der Gemischaufbereitung, Verbrennung und Abgasnachbehandlung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim (Teil-) Einsatz von biogenen Kraftstoffen.**

- Ziele:
- Anpassung der Systeme an die Nutzung von biogenen Kraftstoffen resp. Gemische
  - Reduktion der Schadstoffemissionen
  - Unterstützung der Schweizer Motorenindustrie für die Entwicklung neuer Systeme mit vorerst kleinem Marktanteil respektive Stückzahlen
  - Kostenreduktion von für biogene Kraftstoffe geeignete Systeme
- Kommentar:
- Der Einsatz biogener Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren erfolgt bisher vorwiegend durch die Anpassung bestehender Systeme. Die Auswirkungen der besonderen Eigenschaften dieser Kraftstoffe auf die Gemischaufbereitung, den Verbrennungsprozess sowie die Abgasbehandlungssysteme sind im Vergleich zu den fossilen Brennstoffen noch wenig erforscht.
- Akteure:
- ETH-Bereich mit Erfahrungen in der Konzipierung von Verbrennungsmotoren mit extrem tiefen Emissionen und von Abgasnachbehandlungssystemen.
  - Fachhochschulen mit Erfahrung in den Bereichen Gemischaufbereitung und Abgasnachbehandlungssysteme.
  - Motorenhersteller.
  - Eventuell Zusammenarbeit mit Herstellern von Abgasbehandlungssystemen.
  - Eventuell Kooperation mit FP Biomasse.
- Mittleinsatz: 15 %
- Projektideen:
- Untersuchung und Verbesserung von Teilsystemen für biogene Kraftstoffe
  - Vergleich unterschiedlicher biogener Treibstoffe und Anpassungsbedarf am Motor
  - Adaption optimierter Teilsysteme in P + D Projekt
  - Abschätzung Marktpotenzial und Eignung unterschiedlicher Brennstoffe für die Nutzung in Motoren

#### **SCHWERPUNKT 5:**

##### **Optimierung der Gemischaufbereitung und Verbrennung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim Einsatz von konventionellen und biogenen Kraftstoffen in der atmosphärischen Verbrennung im kleinskaligen Bereich.**

- Ziele:
- Erhöhung Wirkungsgrad von kleinen Öl-Heizkesseln vor allem im Teillastbereich
  - Reduktion der Schadstoffemissionen
  - Nutzung von flüssigen biogenen Brennstoffen in kleinen Heizkesseln
- Kommentar
- In den kommenden Jahren wird der Heizkessel –trotz starkem Zuwachs des Wärmepumpenanteils – noch nicht vom Markt verschwinden. Auch im Ersatzgeschäft wird durch Gebäudesanierungen der Wärmeleistungsbedarf immer kleiner. Es ist somit zweckmässig gerade die kleine Systeme (< 15 kW) weiter zu verbessern und auch für flüssige biogene Brennstoffe anzupassen. Eine bessere Gemischbildung – als Voraussetzung für einen modulierenden Betrieb – erfordert eine vorgängige Vergasung des Brennstoffs. Dafür kann erarbeitetes Know How aus früheren vom BFE unterstützten Projekten genutzt werden.
- Akteure:
- ETH-Bereich mit Erfahrungen in der Konzipierung von Verbrennungsmotoren mit extrem tiefen Emissionen und von Abgasnachbehandlungssystemen.
  - Fachhochschulen mit Erfahrung in den Bereichen Gemischaufbereitung und Abgasnachbehandlungssysteme.
  - Motorenhersteller.

- Eventuell Zusammenarbeit mit Herstellern von Abgasbehandlungssystemen.
- Eventuell Kooperation mit FP Biomasse.

Mittleinsatz: 5 %

- Projektideen:
- Weiterentwicklung und Adaption des Toby-Brenners für biogene Brennstoffe
  - Untersuchung und Entwicklung von anderen Verfahren zur kleinskaligen und günstigen Vergasung flüssiger Brennstoffe

## SCHWERPUNKT 6

### **Stärkere Vernetzung und Auftritt der Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung und –industrie inkl. Leistungserbringern von Komponenten.**

- Ziele:
- Stärken bestehender Kontakte der Forschergruppen
  - Knüpfen und einbinden neuer Akteure (Forscher, Entwickler, Hersteller, Zulieferer, Nutzer, Finanzierer, Gesetzgeber)
  - Verstärken der internationalen Präsenz
  - Verbessern Auftritt und Kommunikation auch gegenüber der Politik

Kommentar: Die Verbesserung und Stärkung der Kommunikation und Vernetzung unter den Forschenden wie auch der Industrie und den Zulieferern ist grundsätzlich eine Daueraufgabe die gut von der unabhängigen Position der öffentlichen Hand wahrgenommen und unterstützt werden kann. Basis dafür ist die Schaffung entsprechender Kontaktverzeichnisse und einer Plattform für den Informationsaustausch.

- Akteure:
- Know How Träger über die Schweizer Akteure
  - Die Schweizer Akteure im Thema Verbrennungssysteme selber (Teilnahme an Meetings, Liefern von Informationen etc.)
  - BFE als Organisator von Veranstaltungen

Mittleinsatz: 5 %

- Projektideen:
- Etablieren einer Schweiz Verbrennungstagung mit Fokus Informationsaustausch zwischen den Akteuren und Plattform zur Präsentation der Leistungen
  - Aufarbeitung und Fortschreibung eines Who is Who in der Schweizer Verbrennungsszene (Forschung, Herstellung, Anwendung)
  - Verstärken des Informationsflusses gegen innen (in der Szene) und gegen aussen
  - Publikationen von Projekten in anerkannten Fachzeitschriften
  - Website für das Forschungsprogramm Verbrennung des BFE [19]

## Referenzen

- [1] Konzept der Energieforschung des Bundes ([www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch))
- [2] Energy Technology Perspectives IEA International Energy Agency 2008 ([www.iea.org](http://www.iea.org))
- [3] FVV Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Deutschland ([www.fvv-net.eu](http://www.fvv-net.eu))
- [4] International Combustion Symposium; The Combustion Institute ([www.combustioninstitute.org](http://www.combustioninstitute.org))
- [5] Forschungsprogramme des Bundesamtes für Energie ([www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch))
- [6] Vision 2000 Wattgesellschaft; Novatlantis c/o CCEM PSI Villigen ([www.novatlantis.ch](http://www.novatlantis.ch))
- [7] Luftreinhalte-Verordnung vom 16.Dezember 1985, Stand 1. Januar 2009
- [8] ThermMix Heizkessel, Walter Meier AG ([www.waltermeier.com](http://www.waltermeier.com))
- [9] Untersuchungen zur Katalytischen Verdampfung von L. Griesser ([www.erdoel-vereinigung.ch](http://www.erdoel-vereinigung.ch))
- [10] Referenzentwicklung Wärmepumpenmarkt, Basics AG, Zürich (Studie im Auftrag des BFE, 2008)
- [11] Entwicklung der schweizerischen Gesetzgebung im Bereich der Abgasemissionen von Motorfahrzeugen und Maschinen (Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Luftreinhaltung und NIS; Bern, Oktober 2008)
- [12] United States Environmental Protection Agency ([www.epa.gov](http://www.epa.gov))
- [13] Ministry of Environment Japan ([www.env.go.jp](http://www.env.go.jp))
- [14] California Certification Exhaust Emission Standards ([www.epa.gov/OMS/stds-ld.htm](http://www.epa.gov/OMS/stds-ld.htm))
- [15] International Convention on the Prevention of Pollution from Ships MARPOL ([www.imo.org](http://www.imo.org))
- [16] IEA Combustion: International Energy Agency Implementing Agreement for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion ([www.ieacombustion.com](http://www.ieacombustion.com))
- [17] WPPF Working Party for Fossil Fuels der Internationalen Energie Agentur ([www.iea.org](http://www.iea.org))
- [18] High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships ([www.ip-hercules.com](http://www.ip-hercules.com))
- [19] Website BFE Forschungsprogramm Verbrennung ([www.bfe.admin.ch /forschungverbrennung/](http://www.bfe.admin.ch/forschungsverbrennung/))