



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

ENERGIEFORSCHUNGSPROGRAMM VERBRENNUNG UND WKK FÜR DIE JAHRE 2013-2016

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ausgearbeitet durch:

Stephan Renz, Beratung Renz Consulting, Elisabethenstr. 44, 4010 Basel;
stephan.renz@renzconsulting.ch

Begleitgruppe:

Ch. Bach, Prof. K. Boulouchos, Dr. J. Czerwinski, K. Heim, Dr. S. Hermle, Dr. G. Lustgarten

Bezugsort der Publikation: www.bfe.admin.ch/forschungverbrennung

Inhaltsverzeichnis

1. Vernetzung zu anderen BFE-Forschungsprogrammen und Zielvorgaben	4
2. Forschungsstand heute und künftige Herausforderungen	5
3. Rahmenbedingungen	7
4. Nationale Akteure und Vernetzung	9
5. Internationale Zusammenarbeit	10
6. Zielsetzungen der Verbrennungsforschung	10
7. Forschungsschwerpunkte in den Jahren 2013 – 2016	13

1. Vernetzung zu anderen BFE-Forschungsprogrammen und Zielvorgaben

Die **Verbrennungsforschung** ist primär auf den Verbrennungsprozess mit den Teilbereichen Brennstoffe, Brennstoffaufbereitung, Einspritzung, Zündung, Verbrennung und Abgasnachbehandlung fokussiert. Die Herkunft und die Aufbereitung der Brennstoffe wie Holz, Biomasse oder Wasserstoff werden in anderen Forschungsprogrammen (FP) des Bundesamts für Energie (BFE) untersucht. Dasselbe gilt für den praktischen Einsatz von Systemen mit der Verbrennung als Energieumwandlungsprozess. Dazu gehören Motoren in Fahrzeugen oder Schiffen (Verkehr), Motoren und Gasturbinen für die Strom- und Wärmeerzeugung (Kraftwerk 2020) oder Heizkessel für die Gebäudebeheizung (Gebäude, Biomasse & Holzenergie). Hinzu kommen Motoren für Baumaschinen oder spezielle Feuerungen für Industriebetriebe (Industrielle Prozesse). Die Vernetzung ist in *Figur 1* dargestellt. Um Doppelspurigkeiten zu vermeiden ist eine gute Zusammenarbeit wichtig.

Im vorliegenden Konzept werden auch die Herausforderungen und die Ziele des Forschungsprogramms **Wärmeerkopplung (WKK)** behandelt.

Übergeordnet gelten die **Zielvorgaben der Eidgenössischen Energieforschungskommission (CORE)** [1]. Für die Periode 2013 -16 hat die CORE ihre Forschungsziele in vier Schwerpunkte gegliedert: **Wohnen und Arbeiten der Zukunft, Mobilität der Zukunft, Prozesse der Zukunft und Energiesysteme der Zukunft** [1]. In *Figur 1* sind diese analog zum Forschungskonzept der CORE farblich gekennzeichnet. Daraus ist auch ersichtlich, dass die Verbrennungsforschung indirekt von jedem Schwerpunktthema betroffen ist. Die CORE-Ziele an die Verbrennung lassen sich von den Zielen der anwendungsorientierten Forschungsprogramme ableiten. Diese sind zusammenfassend im **Energieforschungskonzept des BFE** für die Periode 2013 – 16 festgehalten [2].

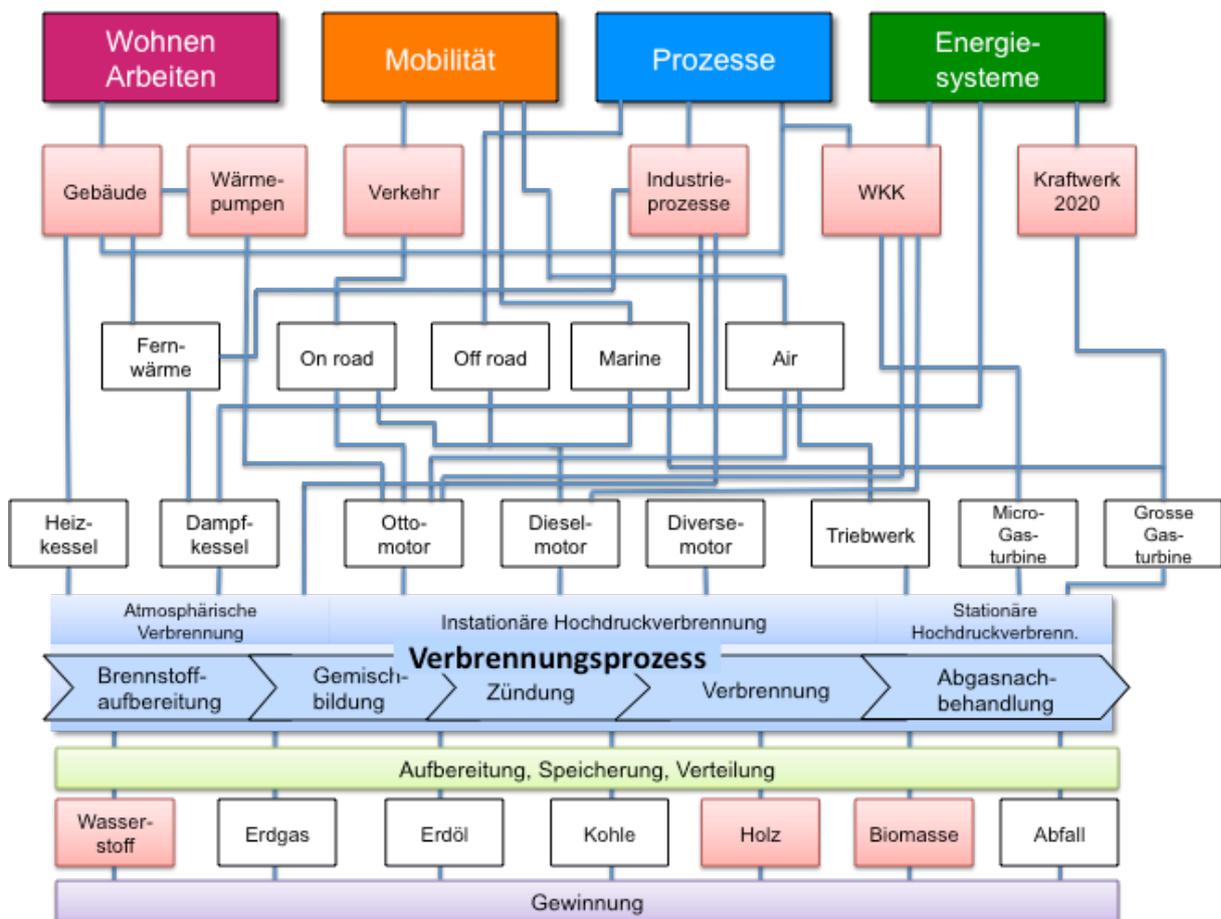


Fig. 1: Vernetzung der Querschnittstechnologie Verbrennung
 = Forschungsschwerpunkte im CORE-Konzept
 = BFE-Forschungsprogramme
 = Technologien und Anwendungsbereiche mit Verbrennung

2. Forschungsstand heute und künftige Herausforderungen

2.1 Brennstoffe

2.1.1 Fossile Brennstoffe

Für **mobile Anwendungen** werden unverändert vorwiegend die flüssigen fossilen Brennstoffe Benzin und Diesel eingesetzt. In der Schifffahrt wird Schweröl (Marine Diesel) und in der Luftfahrt Kerosin verwendet. Gasförmige Brennstoffe auf der Basis von Erdgas werden erst in geringem Ausmass beispielsweise für Busse, Autos oder Schiffe verwendet.

Bei **stationären Anwendungen** für die Stromproduktion dominieren Kohle und Erdgas. In den USA werden Kohlekraftwerke zunehmend durch mit Erdgas betriebene Gas-Kombi-Kraftwerke (GuD) ersetzt. Ein starker Zubau von Kohlekraftwerken findet in China und Indien statt. Japan vollzieht einen Wechsel in der Stromerzeugung aus Atomenergie auf fossile Brennstoffe. Für die Gebäudebeheizung hat Heizöl den grössten Anteil. In der Schweiz soll dieser langfristig erheblich reduziert werden.

In den vergangenen 10 Jahren hat sich das Preisgefüge für fossile Brennstoffe markant verändert. Zwischen 2002 und 2007 ist der Preis für **Rohöl** von ca. 25 \$/Barrel auf über 100 \$/Barrel gestiegen. Die Preise für Erdgas sind – vor allem in den USA – in den letzten 5 Jahren dagegen erheblich gesunken. Neue Technologien für die Förderung von **Schiefergas** (Fracking) ermöglichen die günstige Gewinnung von sehr grossen Erdgasvorkommen, die in den USA zu einem Überangebot und zu Exporten geführt haben. Auch in Europa gibt es grosse Schiefergasvorkommen. Aus ökologischen Gründen ist das Fracking jedoch sehr umstritten und beispielsweise Frankreich erliess ein Gesetz gegen die Gewinnung von Schiefergas. Polen startete dagegen ein grosses Programm zur Erkundung der Vorkommen. Die IEA benennt die Situation als **«Golden Age of Gas»** und hat dazu Regeln für eine nachhaltige Umsetzung aufgestellt [3]. Die Technologien zur Gewinnung von Erdöl wurden ebenfalls weiterentwickelt und erlauben die besser Ausbeutung bestehender Ölfelder und die Gewinnung von unkonventionellen Vorkommen. [4]

In der Zukunft wird eine starke Zunahme von Anwendungen mit Erdgas als Brennstoff erwartet. Ausgebaut wird die Gasnutzung für die Stromerzeugung wie auch für mobile Anwendungen. Vorteile sind teilweise der Preis (USA) und die geringeren CO₂-Emissionen mit dem Brennstoff Erdgas. In der Schifffahrt wird Erdgas zudem zum Einhalten der zunehmend strengeren Emissionsvorschriften in Küstennähe eingesetzt. Dies erfordert Dual-Fuel-Verbrennungssysteme.

Die Nutzung von **Kohle** hat in der Schweiz geringe Bedeutung. International ist Kohle jedoch der wichtigste fossile Brennstoff für die Stromerzeugung.

Neben dem Ressourcenverzehr sind die CO₂-Emissionen das Hauptproblem der Nutzung fossiler Brennstoffe. Eine möglichst effiziente Umwandlung in nutzbare Energieformen hat deshalb hohe Priorität. Dabei ist auch die Wertigkeit der Energieträger zu berücksichtigen und beispielsweise in Verbrennungskraftmaschinen ein Maximum an Exergie zu gewinnen. Strategien zur Verminderung des an die Atmosphäre emittierten Kohlenstoffdioxid (CO₂) beinhalten auch dessen Elimination vor oder nach der Verbrennung und die unterirdische Lagerung (**CCS** Carbondioxid Capture and Storage). Geeignete Technologien werden bereits heute in grossem Massstab erprobt. Auch in der Schweiz werden Abklärungen betreffen die Lagerung von CO₂ durchgeführt. Damit CCS realisiert werden kann, müssen die Verbrennungssysteme entsprechend angepasst werden. So werden grosse Kraftwerke teilweise nach der Vorgabe «CCS-ready» gebaut.

2.1.2 Biogene Brennstoffe (Biobrennstoffe)

Biobrennstoffe bestehen aus biologisch-organischem Material und werden in unveränderter (Holz) oder veränderter Form (Biomethan, Biodiesel, Bioethanol) in fester, flüssiger oder gasförmiger Form genutzt. In diversen europäischen Ländern ist die Beimischung zu konventionellen Brennstoffen wie Erdgas, Diesel oder Benzin marktgängig. Auch in der Schweiz werden diese Brennstoffe angeboten. Die direkte Nutzung erfolgt vor allem beim Holz (Pellets, Schnitzel in Heizkesseln) und teilweise beim Biogas (Verbrennung in Gasmotoren zur Stromerzeugung).

Die direkte Kultivierung und Gewinnung von einjährigen oder mehrjährigen Pflanzen zur Brennstoffproduktion steht bei begrenzter landwirtschaftlich nutzbarer Fläche in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Gemäss [5] sollen in der Schweiz in erster Linie biogene Abfälle, Hofdünger und Reststoffe aus der land- und forstwirtschaftlichen Produktion genutzt werden (Biomasse 2. Generation). International haben die Produktion von Ethanol (Zuckerrohr) oder Biodiesel (Palmöl) grosse Bedeutung.

Die Forschung über die Gewinnung und Konfektionierung von Biomasse zu Biobrennstoffen wird im **BFE-Forschungsprogramm Biomass und Holzenergie** behandelt.

2.1.3 Synthetische Brennstoffe und Wasserstoff

Synthetisch hergestellte Brennstoffe umfassen eine breite Palette von Grundstoffen, Umwandlungsverfahren und Eigenschaften. Die Herstellung von gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen aus Holz

oder die Herstellung von Benzin aus Wasser, CO₂ und Sonne [6] gehören beispielsweise in diese Kategorie. Wichtig ist in der Zukunft auch die Erzeugung von Wasserstoff aus überschüssigen erneuerbaren Energien wie Wind und Photovoltaik (Power to Gas).

Die Zusammensetzung und die Eigenschaften synthetischer Brennstoffe sind vielfältig und können konventionellen Brennstoffen beigemischt werden. Daraus entstehen besondere Herausforderungen an die Verbrennung. Wichtig ist, dass die Auswirkungen der Brennstoffeigenschaften auf eine hocheffiziente und schadstoffarme Verbrennung bei der Herstellung dieser Brennstoffe berücksichtigt werden.

2.2 Verbrennungssysteme

Das Spektrum der Verbrennungstechnologie ist sehr gross, weshalb sich der Fokus primär auf in der Schweiz entwickelte, hergestellte oder eingesetzte Systeme richtet.

2.2.1 Atmosphärische Verbrennung

In der Schweiz hat die atmosphärische Verbrennung eine sehr grosse Verbreitung in der Form von **Heizkesseln** im Leistungsbereich von wenigen kW bis mehrere MW. Brennstoffe sind primär Heizöl und Erdgas. Für die Gebäudebeheizung wird zunehmend auch Holz in Form von Pellets, Schnitzeln oder Stückholz in Heizkesseln verbrannt.

Heizkessel für Öl oder Gas sind ausgereift, erreichen maximale thermische Wirkungsgrade und halten die geltenden Emissionsgrenzwerte ein. Die Exergie wird hingegen ungenutzt vernichtet. **Das BFE unterstützt deshalb keine Projekte im Bereich konventionelle Heizkessel.**

Die Verbrennung von Holz wird im **BFE-Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie** behandelt, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird.

Grossskalige Anwendungen der atmosphärischen Verbrennung sind **Dampfkessel**, die Dampf für industrielle Prozesse oder für Dampfturbinen erzeugen. In der Schweiz sind keine relevanten industriellen oder forschungsorientierten Aktivitäten mehr vorhanden.

Kleinskalige Spezialanwendungen sind atmosphärische Verbrennungssysteme in Kombination mit dem **Stirlingmotor**, kleinen Dampfmaschinen oder **Mikrogasturbinen** (Heissluft). Die technische Herausforderung ist dabei die Funktionsweise der Wärmekraftmaschine in der kein Verbrennungsprozess stattfindet. Diese Technologieentwicklung wird durch den **Forschungsprogrammteil Wärmekraftkopplung** untersucht.

Sonderfälle der atmosphärischen Verbrennung sind **Industriefeuernungen**. Je nach Prozess erfolgt eine direkte Befuerung des Produktionsgutes (Ziegelei, Zementwerk) oder es wird ein Wärmeträgermedium erhitzt. Die Reduktion des Energieverbrauchs in der Industrie hat eine grosse Bedeutung zur Erreichung der Klimaziele oder der Vorgaben der Energiestrategie 2050 des Bundes. Die Identifikation des Verbesserungs- und Forschungsbedarfs der Industrie soll deshalb zusammen mit dem BFE-Forschungsprogramm Verfahrenstechnik angegangen werden.

2.2.2 Nicht stationäre Verbrennung

Als nicht stationäre Verbrennung wird der Vorgang in Kolbenmotoren mit Fremdzündung (Ottomotor) oder Selbstzündung (Dieselmotor) bezeichnet. Kolbenmotoren werden in verschiedene Formen hergestellt, wobei der **Hubkolbenmotor** die weitaus grösste Verbreitung hat. Die BFE-Verbrennungsforschung konzentriert sich auf diese Art Verbrennungsmotoren in den Leistungsklassen wenige Kilowatt bis mehreren Megawatt.

Verbrennungsmotoren werden in allen Leistungskategorien für **mobile Anwendungen** eingesetzt. Dazu gehören Arbeitsgeräte, Kleinfahrzeuge, Personenwagen, Nutzfahrzeuge, Baumaschinen, Schienenfahrzeuge oder Schiffe. **Stationäre Anwendungen** sind Stromerzeuger, Wärmekraftkopplungsanlagen, grosse stationäre Stromerzeuger oder Notstromaggregate. In der Schweiz bestehen für alle Kategorien Forschungskompetenzen an Hochschulen sowie in der Industrie.

Als **Brennstoff** ist eine breite Palette von flüssigen oder gasförmigen kohlewasserstoffbasierten Energieträgern möglich. Relevante Eigenschaften sind die Zündfähigkeit, die Verbrennungsgeschwindigkeit und die Schadstoffbildung. Vermehrt müssen im Verbrennungsmotor unterschiedliche Brennstoffe und Mischungen davon genutzt werden können. (Vgl. 2.1.2, 2.1.3)

Um den Verbrauch an Energieressourcen zu reduzieren und damit die CO₂-Emissionen zu senken ist eine Erhöhung des **Wirkungsgrads** von Verbrennungsmotoren in allen Betriebszuständen erforderlich. Dieser ist vor allem im Teil- und im Wechsellastbetrieb ungenügend, weshalb beispielsweise ein Personenwagen im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) nur einen Wirkungsgrad von ca. 20 % erreicht [7]. Der Gesetzgeber erlässt deshalb Vorgaben über die zulässigen CO₂-Emissionen von Personenwagen (vgl. 3.2) und neue Antriebssysteme wie Elektromotoren oder Brennstoffzellen werden angeboten oder entwickelt. Interessant sind zudem Kombinationen wie hybride Antriebssystem oder Elektrofahrzeuge mit Range-Extender.

Herausforderungen sind deshalb die Erhöhung des exergetischen Wirkungsgrads und die Vermeidung von Schadstoffemissionen. Schwierig ist dies vor allem bei Motoren, die mit laufend veränderten Lastprofilen betrieben werden. Dazu gehören Baumaschine, Busse, Nutzfahrzeuge für die lokale Versorgung oder Personenwagen. Die Verbrennung muss bei diesen Anwendungen vor allem für den Teillast- und den Wechsellastbetrieb optimiert werden. In neuartigen Konzepten wird deshalb das Einsatzprofil des Motors miteinbezogen und das Brennverfahren laufend angepasst. So kann im Teillastbetrieb mit HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) gefahren und bei Vollast auf konventionellen Dieselmotor gewechselt werden. Es werden deshalb zahlreiche unterschiedliche Brennverfahren erforscht (HCCI sowie Abwandlungen davon) und dafür geeignete Brennstoffgemische untersucht. Erforscht werden beispielsweise variable Gemische aus Benzin und Diesel sowie aus erneuerbaren Brennstoffen. Eine wichtige Rolle zur Kontrolle der Brennverfahren spielt auch die Abgasrückführung. Mit gekühlten rückgeführten Abgasen wird die NO_x -Bildung vermindert und die Russ-Bildung wird durch die neuartigen Einspritz- und Verbrennungssysteme stark limitiert.

Dadurch soll das Einhalten der in den letzten Jahren erheblich verschärften **Abgasvorschriften** durch innermotorische Massnahmen ermöglicht oder zumindest erleichtert werden. Für das Einhalten der EURO-Grenzwerte (*Figur 2*) müssen zudem Abgasnachbehandlungssysteme eingesetzt werden. Mit einem SCR-Katalysator werden NO_x reduziert und mit einem Partikelfilter die (Russ-)Partikel eliminiert.

Die Reduktion der CO_2 -Emissionen erfolgt ausser durch die Verbesserung des Wirkungsgrads auch durch den Einsatz von **erneuerbaren oder CO_2 -armen Energieträgern**. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften dieser Brennstoffe entstehen neue Anforderungen an das Verbrennungssystem, um einen hohen Wirkungsgrad bei tiefen Emissionen zu ermöglichen. Wie in 2.1.3 erwähnt, ist es wichtig, bei der Zusammensetzung der Brennstoffe auch Anforderungen des Verbrennungssystems zu berücksichtigen.

2.2.3 stationäre Hochdruckverbrennung

Die kontinuierliche Verbrennung unter hohem Druck erfolgt in Brennkammern von Gasturbinen oder Strahltriebwerken.

Für die Schweiz **relevant sind Gasturbinen** für industrielle Anwendungen und für die Stromerzeugung. Interessant sind Kombianlagen von Gasturbinen mit Dampfturbinen. Diese Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) erreichen heute einen elektrischen Wirkungsgrad von 60% und werden bis zu mehreren hundert Megawatt elektrische Leistung gebaut. Als problematisch bewertet werden die CO_2 -Emissionen und die Abfuhr der Abwärme via Kühltürme an die Umgebung. Hinzu kommen lokale NO_x -Konzentrationen bei Grossanlagen. Als Brennstoff wird primär **Erdgas** eingesetzt. In der Forschung werden Mischungen mit Biogas und Wasserstoff untersucht. Die **Herausforderungen** sind die weitere Verbesserung des Wirkungsgrads und die Vermeidung von CO_2 -Emissionen. Es werden deshalb Möglichkeiten zur Abscheidung des CO_2 und die unterirdische Lagerung untersucht (CCS).

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

Gasturbinen werden auch als **Strahltriebwerke** für Flugzeuge eingesetzt. Forschungsbedarf besteht bezüglich Schadstoff- und Lärmemissionen. In der Schweiz sind keine relevanten industriellen Aktivitäten vorhanden, weshalb das Thema nicht Teil des Konzeptes ist.

3 Rahmenbedingungen

3.1 Vorgaben des Bundes

Der Bundesrat formulierte seine Ziele an die künftige Energieversorgung der Schweiz in der **Energiestrategie 2050 des Bundes** [8]. Darin ist der schrittweise Ausstieg aus der Kernenergie vorgesehen. Der Strombedarf soll durch Einsparungen, erneuerbare Energien sowie durch fossil betriebene WKK- und GuD-Anlagen gedeckt werden. Bei Bedarf werden die Stromimporte erhöht. WKK-Anlagen sollen zur Sicherstellung der Stromversorgung bei mangelnder Verfügbarkeit aus Photovoltaik und Windenergie rasch in Betrieb genommen werden können und im Winter die geringere Produktion ausgleichen helfen. Eine besondere Herausforderung ist die Auflage, dass dabei die Abwärme immer genutzt werden muss. Die Beheizung von Gebäuden mit Heizöl soll stark reduziert werden. Der Anteil an erneuerbaren Energien für die Stromerzeugung soll markant erhöht werden. Neben Sonne und Wind gehört auch die Biomasse dazu. Für den Mobilitätsbereich werden schrittweise die zulässigen CO_2 -Emissionen reduziert. Die Energiestrategie 2050 wird ab 2014 im Parlament behandelt und deshalb hier nicht weiter erörtert.

Die für die Periode 2013 – 2016 gültigen Vorgaben für die vom Bund finanzierte Energieforschung sind im **Energiekonzept der CORE** formuliert [1]. Die vier Forschungsschwerpunkte werden im Kap.1 hier vor erläutert. Relevant und mit dem Konzept der CORE abgestimmt ist das **Energieforschungs-**

konzept des BFE [2]. Darin ist auch der Bereich Verbrennungsforschung abgedeckt, der eine direkte Vorgabe für das vorliegende Forschungskonzept Verbrennung und WKK ist.

3.2 Gesetze und Verordnungen

Massgebend für die Entwicklung von Verbrennungssystemen für den **Schweizer** Markt sind die **Vorschriften** über die zulässigen Abgas-Emissionen und die Auflagen bezüglich CO₂-Ausstoss. Damit wird auch der Treibstoffverbrauch reduziert. Für die Begrenzung der Abgasemissionen von Motorfahrzeugen und Maschinen setzt die Schweiz die Vorschriften der Europäischen Union ein [9]. 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 Personenwagen 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 [10] und die Emissions-Standards in Japan [11]. Hinzu kommen verschärfte lokale Vorschriften wie beispielsweise in Kalifornien [12] oder auch in einzelnen Kantonen der Schweiz (Massnahmegebiete für stationäre Anwendungen wie Heizkessel oder WKK). Für die Schifffahrt in internationalen Gewässern setzt die International Maritime Organisation (IMO) als Agentur der Vereinten Nationen [13] Standards fest. Für die Motorenentwickler, die sich auf einem internationalen Markt behaupten müssen, ist die Situation komplex und bedarf der sorgfältigen Abklärung und Planung.

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 5)	0.50	4.00	0.18	2.0	0.0045	0.02
Euro 6 (ab 2014)	0.50	4.00	0.08	0.4	0.0045	0.01
USA Tier 2 ab 2009	2.6	20.7	0.04	0.27	0.006	0.013
USA Tier 3 ab 2017 -25	1.0	k.A.	0.04	k.A.	0.002	k.A.
Japan 2005	0.63	2.22	0.15	2.0	0.014	0.027
Japan 2009	0.63	2.22	0.08	0.7	0.0019	0.01

Fig.2: Übersicht aktueller Emissionsvorschriften für Dieselmotoren. Die Messungen erfolgen tw. auf Basis unterschiedlicher Fahrzyklen, dies hat einen Einfluss auf den Grenzwert. Die USA-Werte beziehen sich auf div. Fhz.-Kategorien. Für schwere Motorfhz. (LKW) gibt es keine neue Tier.

Emissionen von stationären Anlagen werden in der Schweiz mit die **Luftreinhalteverordnung (LRV)** geregelt [14]. Die Kantone können Massnahmegebiete erlassen und dort tiefere Grenzwerte für Schadstoffe festlegen. Dies wird beispielsweise für WKK-Anlagen angewandt. So fordert beispielsweise die LRV einen Grenzwert für NO_x von 250 mg/m³-Abgas und in der Stadt Zürich werden 50g/m³ gefordert. Der Grenzwert in Deutschland liegt für Magermotoren bei 500 mg/m³. [15]

Der Bundesrat schlägt im ersten Massnahmenpaket zur Energiestrategie 2050 [8] eine schrittweise Begrenzung der **CO₂-Emissionen** für Fahrzeuge vor: Bis 2020 für Personenwagen 95 gCO₂/km und für Lieferwagen und leichte Sattelschlepper 147 gCO₂/km. Dies erfordert eine Senkung des Treibstoffverbrauchs, den Einsatz alternativer Antriebssysteme oder CO₂-arme Brennstoffe.

3.3 Weltweiter und Schweizer Markt

Bestrebungen, den Verbrauch an **fossilen Energieträgern** zu reduzieren, sind bereits seit Jahren im Gange. Trotzdem nahm der Anteil in den vergangenen Jahren weltweit deutlich zu und es wird eine weitere Zunahme prognostiziert. (Fig. 3). Dazu tragen vorwiegend die aufstrebenden Wirtschaftsräume in Asien aber auch Indien bei. In der Schweiz ist der Verbrauch ebenfalls gestiegen [16].

International wie auch in der Schweiz werden Verbrennungssysteme deshalb kaum an Bedeutung verlieren sondern der Absatz wird weiter zunehmen. Durch eine zunehmende Reglementierung wird die Nachfrage nach Anlagen, die effizienter sind und einen geringeren CO₂-Ausstoss pro erzeugte Kilowattstunde aufweisen, steigen. Ein zunehmender Bedarf wird für hocheffiziente Systeme zur Nutzung von erneuerbaren Brennstoffen erwartet.

Der Absatz von Heizkesseln ist in der Schweiz im **Gebäudebereich** rückläufig und soll gemäss Energiestrategie des Bundes erheblich gesenkt werden. Bestehende Gebäude werden isoliert und Neubauten auf minimalen Energiebedarf ausgelegt. Die Wärmeversorgung erfolgt vermehrt mit Solarwärme und Wärmepumpen. Eine interessante Alternative, die den Zielen der Energiestrategie des Bundes entspricht, sind **WKK-Anlagen**. Diese werden beispielsweise in Deutschland in grosser Anzahl abgesetzt, weil deren Anteil an der Stromversorgung von heute 15 % bis 2020 auf 25 % gesteigert

werden soll. In der Schweiz beträgt der Anteil 3 % bzw. 1.95 TWh_e Strom. Bis 2020 sollen 1.65 TWh_e Strom mit neu erstellten fossilen WKK-Anlagen erzeugt werden. [8] Das realisierbare Potential wird auf 6 – 10 TWh_e geschätzt [17]. Hinzu kommt ein Bedarf an WKK-Anlagen für erneuerbare Brennstoffe, der nicht quantifiziert wurde.

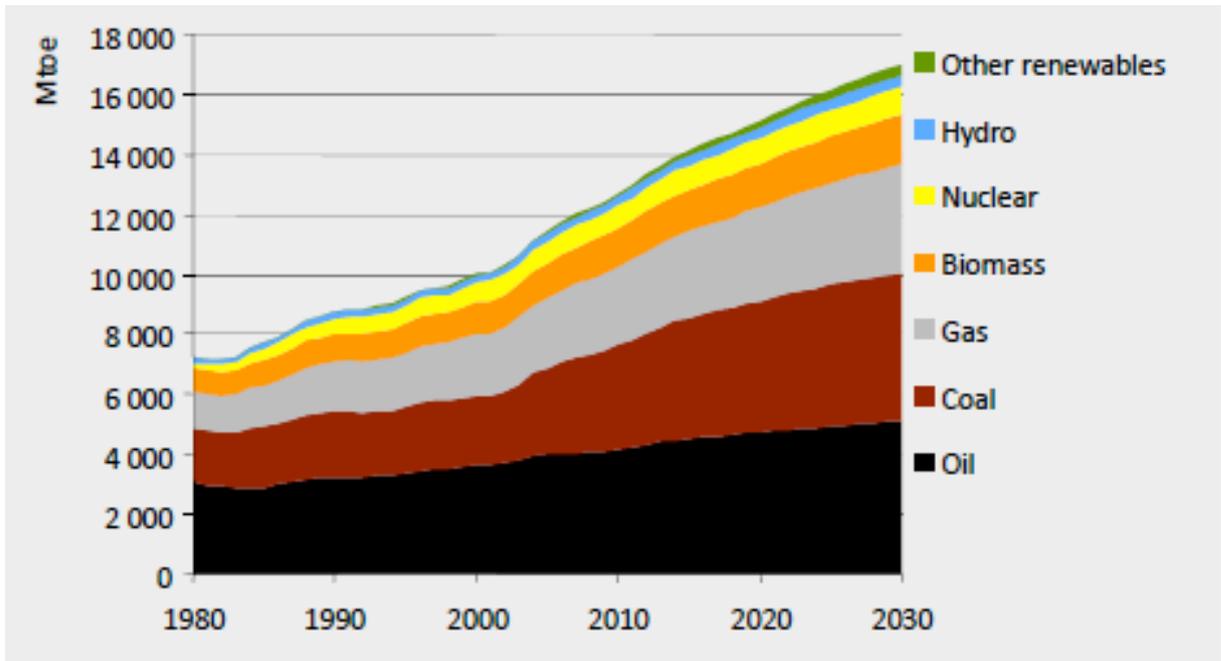


Fig. 3: Weltweiter Primärenergieverbrauch gemäss Referenzszenario der IEA (2008) [18]

Der Absatz von Verbrennungssystemen für die **grossskalige Stromerzeugung** mit Erdgas erfährt zur Zeit vor allem in den USA einen starken Zuwachs. Auslöser sind der Ersatzbedarf sowie die günstigen Erdgaspreise. Gemäss Energiestrategie 2050 des Bundesrats sollen auch in der Schweiz **GuD-Kraftwerke** gebaut werden.

Im **Mobilitätsbereich** werden vor allem für Personenwagen alternative Antriebssysteme entwickelt und erprobt. Dazu gehören Elektromotoren sowie Kombinationen mit Verbrennungsmotoren. Hinzu kommt auch hier die Nutzung erneuerbarer Brennstoffe. Bei den Nutzfahrzeugen erfolgt eine Konzentration auf die Verbesserung des Wirkungsgrads des Antriebssystems und die Nutzung von Erdgas. In der Schifffahrt hat die Reduktion der Emissionen Priorität, die auch durch den Wechsel auf Erdgas erreicht werden kann.

Zusammenfassend kann der Markt nach wie vor als sehr gross und international ausgerichtet bezeichnet werden. Die Anforderungen an die Verbrennungssysteme bezüglich Effizienz, Brennstoffflexibilität und Schadstoffemissionen sind in den letzten Jahren stark gestiegen und werden auch weiterhin zunehmen.

4. Nationale Akteure und Vernetzung

In der Schweiz sind Motoren- und Gasturbinenhersteller, Heizkessel- und Brennerproduzenten, Zulieferer von Komponenten und Systemen für die Verbrennungsindustrie sowie Entwicklungszentren von grossen europäischen Herstellern mit rund 5000 Mitarbeitenden aktiv. Dazu gehören:

ABB Turbo Systems, Baden	Hersteller von Turboladern für Grossdieselmotoren
Alstom (Schweiz) AG, Baden	Grosse Gasturbinen
DUAP AG, Herzogenbuchsee	Einspritzsystemen für Dieselmotoren (mittlere bis grosse)
FPT Motorenforschung AG, Arbon	Entwicklungszentrum von Dieselmotoren für Fiat-Konzern
Kistler Instrumente AG, Winterthur	Messsonden und -systeme für Verbrennungsmotoren
Liebherr Machines Bulle SA, Bulle	Hersteller von Diesel- und Gasmotoren
Sonceboz SA	Mechatronische Kontrollsysteme für Verbrennungsmotoren
Wärtsilä Schweiz AG, Winterthur	Entwicklungszentrum 2-Takt Grossdieselmotoren bis 85'000 kW

Hinzu kommen Forschungsinstitute des ETH-Bereichs sowie von zahlreichen Fachhochschulen.

Die Unternehmen haben eine langjährige Tradition und sind auf die internationalen Märkte ausgerichtet. Einige von ihnen haben massgebende Innovationen von Verbrennungssystemen erfunden und sind in ihrem Bereich führend.

Forschende aus Hochschulen und der Industrie arbeiten in zahlreichen Projekten zusammen. Eine Vernetzung der Akteure erfolgt zudem in der alle 2 Jahre vom BFE mitorganisierten Tagung über Verbrennungsforschung in der Schweiz. Jährlich findet ein Treffen der Hochschulkompetenzgruppe Verbrennung (HKV) statt. Die Industrie führt im Rahmen der Swissmem eine Fachgruppe Verbrennungsmaschinen.

5. Internationale Zusammenarbeit

Die Verbrennungsforschung erfordert eine **internationale Vernetzung**. Die Industrie, die Hochschulforschenden und das BFE sind in verschiedenen Gremien aktiv.

Ein wichtiger internationaler Erfahrungsaustausch erfolgt im Rahmen der **Technology Agreement der Internationalen Energieagentur (IEA)**. Für die Verbrennung relevant sind:

- **Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion** [19]. Ziel: Entwicklung von Verbrennungstechnologien, die einen verminderten Treibstoffverbrauch und geringere Partikelemissionen aufweisen, für industrielle Anwendungen voranzutreiben. Aktuell werden in sieben Tasks die Themen Homogeneous Charge Compression Ignition, Gas Turbines, Sprays, Alternative Fuels, Nanoparticle Diagnostics, Gas-Engines und Chemical Kinetics bearbeitet.
- **Advanced Motor Fuels**. [20] Ziel: Vernetzen der internationalen Forschung und die Implementierung von sauberen, energieeffizienten und nachhaltigen Treibstoffen und den damit zusammenhängenden Fahrzeugtechnologien fördern.
- **Bioenergy**. [21] Ziel: Internationaler Informationsaustausch und teilen von Erfahrungen im Bereich Technologieentwicklung, nicht-technische Hindernisse, regulatorische und gesetzgebende Aspekte. Das Agreement Bioenergy deckt die ganze Biomassewertschöpfungskette von der Ernte, Substrataufbereitung, Konversionstechnologien zur Produktion von Strom, Wärme und Treibstoff ab.
- **Working Party on Fossil Fuels** [22]. Arbeitsgebiete: Vorkommen, Gewinnung und Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie die Elimination und Entsorgung von CO₂ (CCS Carbon Capture and Storage). Die Gruppe führt diverse Technology Agreements wie Greenhouse Gas, Clean Coal Center oder Gas- and Oil Technologies.

Das Bundesamt für Energie ist in den Leitungsgremien der vorgenannten Gruppen engagiert und zahlreiche Schweizer Forschende arbeiten in Projekten mit. Das Engagement soll beibehalten und die Teilnahme an Projekten ausgebaut werden.

Das **Combustion Institut** [23] 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.

Schweizer Industrie und Hochschulforscher haben Einsitz im International Council on Combustion Engines (**CIMAC**) [24], welches sich vor allem mit dem Grossmotorenbau beschäftigt. Wichtig ist auch die Mitarbeit in der **SAE** (Society of Automotiv Engineers) [25]. Zahlreich Schweizer Forschende sind Mitglied dieser Organisation und nehmen an Seminaren und Konferenzen teil. Vom BFE mitfinanzierte Projekte wurden auch schon evaluiert und in der Fachpublikation der SAE veröffentlicht [26]. Die SAE hat eine Ländergruppe in der Schweiz.

Auf europäischer Ebene erfolgt eine Zusammenarbeit in Projekten der **EU Forschungsprogramme**. Ein Beispiel ist das vom BFE mitfinanzierten Projekt HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships) [27]. 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** [28] werden international ausgeschrieben und im Wettbewerb zu anderen Universitäten und Forschungsinstitutionen vergeben. Institute der ETHZ erhielten bereits für verschiedene Forschungsaufträge der FVV den Zuschlag und wurden dabei vom BFE finanziell unterstützt.

6. Zielsetzungen der Verbrennungsforschung

Die zu erreichenden Ziele der Verbrennungsforschung für die Periode 2013 – 16 orientieren sich an den Vorgaben der CORE, den Zielen des Energieforschungskonzepts des BFE sowie an den Erkenntnissen aus der Situationsanalyse (Kap. 2) sowie über die Entwicklung der relevanten Rahmenbedingungen (Kap. 3).

6.1 Technische Ziele

Erhöhung des exergetischen Wirkungsgrads von Verbrennungssystemen

Um den Verbrauch der Energieträgervorkommen sowie die CO₂-Emissionen aus Verbrennungssystemen zu reduzieren, muss der exergetische Wirkungsgrad erhöht werden. Dies gilt uneingeschränkt für alle Arten von Energieträgern, also für fossile wie auch erneuerbare Brennstoffe. Die Vorkommen sind entweder begrenzt oder die Gewinnung ist aufwendig und verbraucht andere Ressourcen.

Der Forschungsbedarf besteht in der Verbesserung des eigentlichen Verbrennungsprozesses sowie des Ladungswechsels bei unterschiedlichen Lastzuständen der Verbrennungskraftmaschine. Der FP-Teil Verbrennung fokussiert dabei auf Verbrennungsmotoren. Andere Systeme zur Exergiegewinnung aus der Verbrennung wie Stirlingmotoren, Dampfmaschinen, Dampfturbinen oder Heißluftturbinen werden im FP-Teil WKK oder FP KW2020 behandelt. Faktoren wie beispielsweise Reibungsverluste oder Einsatzprofile des Systems werden nur betrachtet, falls eine Wechselwirkung zum Verbrennungsprozess besteht.

Reduktion der Schadstoffemissionen insbesondere von NO_x und Partikel

Die Grenzwerte der Schadstoffemissionen wurden in nahezu allen Anwendungsbereichen von Verbrennungssystemen erheblich reduziert. Neben Partikelemissionen wie PM10 werden auch Metalloxide sowie Aerosole thematisiert. Um die geforderten Grenzwerte einzuhalten, werden verschiedene Strategien verfolgt. Dazu gehören vorwiegend auf die Abgasnachbehandlung fokussierte oder verstärkt auf innermotorische Verbesserung des Verbrennungsprozesses ausgerichtete Massnahmen.

Eine besondere Herausforderung ist das Einhalten der Grenzwerte bei verschiedenen Lastzuständen sowie im transienten Betrieb. Hinzu kommen Inhomogenitäten in multiplen Verbrennungssystemen wie dem Kolbenmotor: Es bestehen Abweichungen von Zylinder zu Zylinder.

Massnahmen zur Vermeidung der Schadstoffbildung wirken sich teilweise gegenteilig auf einzelne Schadstoffe aus. So bewirken innermotorische Vermeidungsstrategien für NO_x eine Zunahme der Russbildung (sowie eine Verminderung des Wirkungsgrades). Massnahmen in der Brennstoffzusammensetzung sowie der Abgasnachbehandlung müssen in die Betrachtungen mit einbezogen werden.

Optimierung der Systeme für die Nutzung von gasförmigen Brennstoffen

Aufgrund des international erhöhten Angebots von Erdgas und des Vorteils der geringeren CO₂- sowie Schadstoffemissionen wird eine zunehmende Nutzung in motorischen Verbrennungssystemen erwartet. Dies in stationären wie auch mobilen Anwendungen. Hinzu kommt die Beimischung oder alleinige Nutzung von gasförmigen erneuerbaren Brennstoffen. Verbrennungssysteme sollen für die Nutzung dieser Brennstoffe bzw. Brennstoffgemische bezüglich Wirkungsgrad, Flexibilität, Emissionen und Standfestigkeit optimiert werden.

Nutzung von und Anforderungen an erneuerbare (biogene und synthetische) Energieträger

Neben den vorgenannten gasförmigen Brennstoffen werden zahlreiche weitere flüssige Energieträger eingesetzt oder erprobt. Die Optimierung soll von zwei Seiten angegangen werden: Anpassung der Verbrennungssysteme an die Eigenschaften der Brennstoffe und Anpassung der Eigenschaften der Brennstoffe an die Anforderungen für eine hocheffiziente und „Near Zero Emission“ Verbrennung. Dafür müssen Grundlagen erarbeitet, Brennstoffeigenschaften (auch von Mischungen) erprobt, Brennverfahren untersucht und Verbrennungssysteme angepasst werden. Die Erkenntnisse sollen auch in die Herstellung und Mischung von Brennstoffen einfließen. Dafür ist eine Zusammenarbeit mit dem FP Biomasse und Holzenergie anzustreben.

Weiterentwicklung der Entwicklungswerkzeuge für die Forschung

Um die hochkomplexen kinetischen, chemischen und thermischen Vorgänge im Gemischbildungs-, Verbrennungs- und Gaswechselprozess weiter zu optimieren, müssen die Detailkenntnisse darüber und die Methoden zur Darstellung weiter verbessert werden. Dazu gehören die physikalischen Grundlagen, die Berechnung und Simulation der Strömung und des Ablaufs der chemischen Reaktionen sowie Versuchsträger und Messmethoden, um die Vorgänge beobachten und die Ergebnisse der Simulation validieren zu können. Bisher wurde ein hoher Stand des Wissens erreicht. Dieser soll weiterentwickelt werden und für neue Brennverfahren und Brennstoffe ausgeweitet werden.

Optimierung von WKK-Anlagen als Gesamtsystem inkl. Strom- und Wärmeversorgung

Der Wirkungsgrad und der Nutzen von WKK-Anlagen als Teil des Energieversorgungssystems hängen auch von der Einbindung in die vor- oder nachgelagerte Strom- und Wärmeversorgung ab. In Zukunft werden vermehrt variable Stromerzeuger in das Netz einspeisen und der Betrieb von steuerbaren Einheiten wie WKK-Anlagen muss darauf abgestimmt werden. Besonders zu beachten ist die Speicherung und Nutzung der dabei erzeugten Wärme. Hinzu kommt der Einbezug der Verfügbarkeit des Brennstoffs wie beispielsweise Biogas.

Beispielhaft lassen sich die technischen Ziele für die Forschung wie folgt quantifizieren.

Verbrennungssystem	Stoff Faktor	Einheit	2012 LRV od. Euro 5	2020	2035
Stat. Gasmotor >100 kW für 500 kW	NOx	mg/Nm ³	400/ 50	10	1
	CO	mg/Nm ³	650	20	5
	η	%	42	50	55
Stat. Gasmotor 10 kW	NOx	mg/Nm ³	k.a.	10	5
	CO	mg/Nm ³	k.a.	100	50
	η	%	27	35	40
Schwere Fz (LKW, Bus): - Diesel:	NOx	g/kWh	2.0	2.0	1.0
	Russ (PM)	g/kWh	0.02	0.02	0.01
	η	%	45	48	55
- Otto (Gas, Ethanol)	NOx	g/kWh	2.0	2.0	1.0
	Russ (PM)	g/kWh			0.005
	η	%	36	42	48

Fig. 4: Kennzahlen zur angestrebten Technologieentwicklung für Diesel- und Gasmotoren. Werte NO_x/Nm³ bezogen auf 5 % O₂.

6.2 Wirtschaftliche Ziele

Reduktion der Kosten für die Entwicklung verbesserter Verbrennungssysteme

Zur Erreichung der technischen Ziele, 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 in die Lösungssuche miteinbeziehen. Die unter 6.1 geforderte laufende Verbesserung der Modelle und Codes für die numerische Simulation entspricht somit nicht nur den technischen Zielsetzungen, sondern ist auch wirtschaftlich relevant.

Konkurrenzfähigkeit effizienter und schadstoffminimierter Verbrennungssysteme verbessern

Der Markterfolg von effizienten und unter die gesetzlichen Grenzwerte schadstoffminimierter Systeme hängt von deren Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu konventionellen ab. Forschungsvorhaben sollen deshalb praxistaugliche und bezüglich Investitionen und Betriebskosten konkurrenzfähige Lösungen hervorbringen.

6.3 Organisatorische Zielsetzungen

Hohe Kompetenz in den Fachgruppen halten und ausbauen

In ausgewählten Themen weisen die Schweizer Forschenden einen von der Industrie und von führenden Forschungsinstitutionen auch international anerkannten hohen Stand auf. Um die Kompetenz zu halten und weiter zu entwickeln sollen die kompetenten Forschergruppen, unter Berücksichtigung der vorgenannten technischen und wirtschaftlichen Zielsetzungen, gefördert werden.

Gute Vernetzung von Forschenden aus Hochschulen und Industrie fördern

Das Ziel von produktorientierter Forschungsarbeit ist die Umsetzung in marktfähige Produkte. Gute Kontakte zwischen den universitären sowie anwendungsorientierten Forschungsinstitutionen und der Industrie - im Idealfall mit gemeinsamen Projekten - ist deshalb notwendig. Die Forderung zur verstärkten Nutzung von neuartigen 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 Beachtung zu verschaffen und gezielt Forschungsprojekte zu initiieren und mitzugestalten. Dies beispielsweise durch die Mitarbeit in der Internationalen Energieagentur (IEA).

Kommunikation nach innen und nach aussen verstärken

Die Erfolge der Verbrennungsforschung sollen verstärkt kommuniziert werden. Genutzt werden sollen die Kommunikationsmittel des BFE wie Website, Energieia und Programmleiterberichte sowie externe Fachzeitschriften. Die Forschenden sollen die Ergebnisse in Publikationen und durch Konferenzbeiträge verbreiten. Periodisch soll eine Fachtagung über die Verbrennungsforschung in der Schweiz durchgeführt werden.

7. Forschungsschwerpunkte in den Jahren 2013 – 2016

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 durch die Forschung und die Weiterentwicklung von bestehendem und durch das BFE mitfinanziertem Wissen.

SCHWERPUNKT 1:

Weiterentwicklung der Forschungsmethoden und –instrumente für konventionelle und für biogene Energieträger 2. Generation

Bedeutung Um die hochkomplexen Vorgänge im Verbrennungsprozess zu verbessern müssen diese gut verstanden und dargestellt werden können. Das erworbene Wissen soll weiterentwickelt werden und für biogene sowie neuartige Brennstoffe erweitert werden. In der Schweiz sind auf diversen Gebieten spezialisierte und international anerkannte Forschergruppen aktiv. Deren Wissen soll gepflegt und erweiterte werden.

Ziele:

- Erweiterung der Kenntnisse über die chemischen und physikalischen Grundlagen der Verbrennung.
- Fortsetzung der Entwicklung numerischer Simulationsmodelle für komplexe Strömungen und reaktive Medien.
- Anpassung respektive Erweiterung der Instrumente für die Verbrennungsforschung für biogene und neue zusammengesetzte Brennstoffe. Dazu gehören Simulationsmodelle, Mess- und Analysemethoden sowie Versuchsträger.
- Verstärkte Nutzung von Synergien durch kombinierte experimentelle und numerische Forschung
- Kompetenzen in den Fachgruppen halten und erweitern

Kommentar: Durch die Unterstützung der Weiterentwicklung von 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.

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 für die Nutzung biogener Energieträger

SCHWERPUNKT 2:

Variable Brennstoffnutzung und Schadstoffreduktion in grossen Dieselmotoren (Dual Fuel)

Bedeutung Die Emissionsvorschriften für grosse Dieselmotoren im Marine-Einsatz werden in den nächsten Jahren markant verschärft. In küstennahen Gebieten soll deshalb von Schweröl auf Erdgas umgestellt werden können. Herausforderungen sind die Umstellung der bisher für Schweröl optimierten Motoren und die Zündung des Gasgemisches in diesen Dual-Fuel-Anwendungen.

Ziele:

- Reduktion der Schadstoffemissionen
- Halten und Verbessern des Gesamtwirkungsgrads trotz Massnahmen zur Schadstoffreduktion und Dual-Fuel-Betrieb
- Anwendung für 2-Takt- und 4-Takt-Motoren

Kommentar In der Schweiz ist an Hochschulen, in industriellen Entwicklungszentren und bei Komponentenherstellern eine hohe Kompetenz über Verbrennungssysteme für grosse Marine-Dieselmotoren vorhanden. Durch die gezielte Unterstützung von Forschungsvorhaben können die Entwicklungszentren in der Schweiz gestärkt werden. Zugleich helfen verbesserte Motoren den Energieverbrauch und die Schadstoffemissionen im internationalen Seetransport zu reduzieren. Damit wird ein Beitrag zur Lösung der globalen Energie- und Umweltprobleme geleistet.

Projektideen:

- Entwicklung von Versuchsträgern für die Nutzung von Erdgas in selbstzündenden Dieselmotoren
- Untersuchung Zündverfahren für die Selbstzündung von Erdgas (Piloteinspritzung)
- Anpassung des Gesamtsystems für den optimierten Dual-Fuel-Betrieb

SCHWERPUNKT 3

Verbesserung des Wirkungsgrads und Reduktion der Schadstoffe bei der Nutzung von gasförmigen Brennstoffen in Ottomotoren

Bedeutung Die Nutzung von gasförmigen Brennstoffen vorab Erdgas aber auch Biogas und Gemischen davon - inklusive wasserstoffreiche Gase - werden an Bedeutung gewinnen. Dies vor allem im unteren und mittleren Leistungsbereich für stationäre und mobile Anwendungen.

Ziele:

- Erhöhung der Effizienz von Gasmotoren im stationären und im transienten Betrieb
- Optimierung von Gasmotoren für mobile Anwendungen
- Reduktion der NO_x-Emissionen von Gasmotoren
- Verminderung des Methanschlupfs von Gasmotoren und Verbesserung der Abgasnachbehandlungssysteme (Methanvergiftung)
- Nutzung von know how aus der Entwicklung des «Swissmotors» für sehr kleine und sehr grosse Gasmotoren.

Kommentar: Gasmotoren sind oft angepasste Benzin- oder Dieselmotoren. Eine optimale Anpassung des Verbrennungsprozesses an die Eigenschaften von Erdgas ist notwendig.

Projektideen:

- Evaluation der Praxistauglichkeit des «Swissmotors» und Anpassungsbedarf
- Teilprojekte für die Optimierung von Gasmotoren bis hin zum Gesamtsystem
- Adaption der emissionsoptimierten Motoren für die Nutzung biogener Brennstoffen
- Untersuchung des Einflusses von mit Wasserstoff angereicherten Gasen

SCHWERPUNKT 4:

Erweiterte Kenntnisse über massgeschneiderte Brennstoffe für Dieselmotoren

Bedeutung Flüssige (und gasförmige) Energieträger werden in der Zukunft aus verschiedenen Stoffen zusammengesetzt sein. Wichtig ist, dass nicht nur aufgrund der verfügbaren Stoffe Brennstoffgemische zusammengestellt werden, sondern dass dabei auch die Eigenschaften und Anforderungen des Verbrennungsprozesses berücksichtigt werden. Dafür sind vertiefte Kenntnisse über die Eigenschaften der Stoffe und deren Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess erforderlich.

Ziele:

- Kenntnisse über Relevanz neuartiger Brennstoffe
- Kenntnisse über verbrennungsrelevante Eigenschaften der wichtigen neuartigen Brennstoffe für Dieselmotoren
- Massnahmen zur Optimierung der Dieselmotorenverfahren für neuartige Brennstoffe
- Massnahmen zur Anpassung der Brennstoffe an die Anforderungen des Dieselmotorenverfahrens

Kommentar: Neuartige Brennstoffe für Dieselmotorenverfahren können aus biogenen oder synthetischen Anteilen oder auch aus Diesel-/Benzingemischen bestehen. Zwischen den Brennstoffeigenschaften und der Optimierung des Verbrennungsprozesses bestehen grosse Interdependenzen. Dies soll in der Forschung berücksichtigt werden.

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 des Gesamtsystems, welches die Prozesskette Gemischbildung – Zündung – Verbrennung – Abgasnachbehandlung umfasst

Bedeutung In der Prozesskette des Verbrennungssystems, von der Gemischbildung bis zur Abgasnachbehandlung bestehen zahlreiche Abhängigkeiten. Dies gilt auch für Mehrzylindermotoren und unterschiedliche Betriebszustände.

Ziele:

- Reduktion der Schadstoffemissionen
- Verbessern des Gesamtwirkungsgrads trotz Massnahmen zur Schadstoffreduktion
- Gewährleisten von Schadstoffreduktion und Wirkungsgrad auch im Teillast- und im transienten Betrieb
- Weiterentwicklung der experimentellen und numerischen Forschung für neue Brennverfahren (z.B. Downsizing, vollvariable Ventiltriebe, HCCI)

Kommentar Die Darstellung des Gesamtsystems erfordert experimentelle und numerische Methoden. Für Verbesserungen muss das Gesamtsystem abgestimmt werden können. Da-

für müssen die momentanen Zustände in der Prozesskette bekannt und die Regulierung mit variablen Teilkomponenten wie Einspritzung, Ventiltrieb, Abgasrückführung und –behandlung möglich sein.

- Projektideen:
- Untersuchung neuer Zündsysteme im Kontext biogener/C-armer Treibstoffe
 - Optimierung Gaswechsel/Aufladesysteme für Verbrennungsmotoren
 - Entwicklung verbrauchsarmer, aktiv beheizter Abgasnachbehandlungssysteme zur Eliminierung der Kaltstartemissionen bzw. Erweiterung des Niedriglastbetriebs bei SCR/DPF-Systemen

SCHWERPUNKT 6

Erhöhung des exergetischen Wirkungsgrads durch Abgasenergienutzung

Bedeutung Die Abgase eines Verbrennungsmotors enthalten noch Exergie die ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Es bestehen diverse Möglichkeiten die Exergie zu gewinnen und damit den Gesamtwirkungsgrad des Motors zu erhöhen.

- Ziele:**
- Evaluation geeigneter Systeme zur Abgasenergienutzung
 - Abklären Stand der Technik und Verbesserungsbedarf.

Kommentar Verschiedene System zur Abgasenergienutzung werden heute eingesetzt. Die Anforderungen hohe Effizienz, kostengünstig und Standfestigkeit werden noch nicht erfüllt. Offen ist auch, welche Technologie für welche Motorengrösse und Anwendung geeignet ist. In diesen Schwerpunkt gehört auch die Entwicklung von Energieumwandlern für die Nutzung der Energie aus Holzheizkesseln.

- Projektideen:
- Entwicklung von Systemen zur Abgasenergienutzung von stationären Gasmotoren
 - Entwicklung von Systemen zur Exergienutzung von Holzheizkesseln.
 - Ersatz der onboard-Stromerzeugung bei Fahrzeugen durch Abgasenergie-Konverter

SCHWERPUNKT 7

Optimierung von WKK-Systemen als Ergänzung zur variablen erneuerbaren Stromerzeugung

Bedeutung Der geplante starke Zubau von variablen Stromerzeugungsanlagen wie Photovoltaik und Wind erfordert rasch steuerbare Stromerzeugungseinheit zur Sicherung und Stabilisierung der Versorgung. WKK-Anlagen können diese Aufgabe erfüllen, müssen aber entsprechend angepasst und in die vor- und nachgelagerten Systeme (Brennstoffzufuhr, Elektrizitätsnetz und Wärmenutzung) eingebunden werden.

- Ziele:**
- Hochflexibles WKK-System zur raschen Lieferung von Strom
 - Einbindung von mehreren Einheiten als virtuelles Kraftwerk
 - Adaptierte Wärmenutzung und -speicherung

- Projektideen:
- Entwicklung hocheffiziente Klein-WKK-Anlage für rasche Zu- und Abschaltung
 - Integration stromgeführter WKK-Anlagen in vor-/nachgeschaltete Energiesysteme: Anpassung Anlagensteuerung, Wärmespeicher, Gebäudeheizsystem

SCHWERPUNKT 8

Kommunikation und Vernetzung Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung

Bedeutung Wichtiges Ziel der finanziellen Förderung der Energieforschung durch das BFE ist die Verbreitung des Wissens über verbesserte Systeme. Dazu gehören der Austausch innerhalb der Forschungsgemeinschaft sowie die Kommunikation gegen aussen.

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

Kommentar: Die Verbesserung und die Stärkung der Kommunikation und der Vernetzung unter den Forschenden wie auch der Industrie ist eine Daueraufgabe, die gut von der Produkte unabhängigen Position der öffentlichen Hand unterstützt oder wahrgenommen werden kann.

- Projektideen:
- Fortführen der Schweiz Verbrennungstagung (2-Jahresturnus)
 - Fortschreibung des Who is Who in der Schweizer Verbrennungsszene
 - Einbindung von CH-Forschenden in internationalen Gruppen wie IEA
 - Publikationen von Projekten in anerkannten Fachzeitschriften
 - Laufende Aktualisierung Website für das FP Verbrennung und WKK des BFE

Referenzen

- [1] Konzept der Energieforschung des Bundes 2013 -2016, BFE, 2012 (www.bfe.admin.ch)
- [2] Energieforschungskonzept 2013 -2016 des Bundesamtes für Energie, BFE, 2013 (www.bfe.admin.ch)
- [3] Are we entering a golden age of gas?, IEA International Energy Agency, 2011 (www.iea.org)
- [4] Resources to Reserves, IEA International Energy Agency, 2013 (www.iea.org)
- [5] Strategie für die energetische Nutzung von Biomasse in der Schweiz, BFE, 2010
- [6] High-Flux Solar-Driven Thermochemical Dissociation of CO₂ and H₂O using Nonstoichiometric Ceria; A. Steinfeld et al., Science 24, 2010 (www.sciencemag.org)
- [7] Pkw-Antriebe im Überblick - Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, Springer, 2012
- [8] Botschaft zur Energiestrategie 2050: Ziele und Massnahmen in der Übersicht, Der Bundesrat, 2013
- [9] Entwicklung der schweizerischen Gesetzgebung im Bereich der Abgasemissionen von Motorfahrzeugen und Maschinen (Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Luftreinhaltung und NIS; Bern, Oktober 2008)
- [10] United States Environmental Protection Agency (www.epa.gov)
- [11] Ministry of Environment Japan (www.env.go.jp)
- [12] California Certification Exhaust Emission Standards (www.epa.gov/OMS/stds-ld.htm)
- [13] International Convention on the Prevention of Pollution from Ships MARPOL (www.imo.org)
- [14] Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985, Stand 1. Januar 2009
- [15] Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft,
- [16] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2012, BFE, 2013
- [17] Grundlagen für eine WKK-Strategie, BFE, 2012
- [18] Energy Technology Perspectives IEA International Energy Agency 2008 (www.iea.org)
- [19] IEA Combustion: International Energy Agency Implementing Agreement for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion (www.ieacombustion.com)
- [20] IEA AMF Advanced Motor Fuels Implementing Agreement (www.iea-amf.org)
- [21] IEA Bioenergy (www.ieabioenergy.com)
- [22] WPFF Working Party for Fossil Fuels der Internationalen Energie Agentur (www.iea.org)
- [23] International Combustion Symposium; The Combustion Institute (www.combustioninstitute.org)
- [24] CIMAC, the International Council on Combustion engines, (www.cimac.com)
- [25] SAE, Society of Automotiv Engineers, (www.sae.org)
- [26] Diesel Emissions with DPF & SCR and Toxic Potentials with BioDiesel (RME) Blend Fuels, SAE Nr. 2013-01-0523, 2013
- [27] High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships (www.ip-hercules.com)
- [28] FVV Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Deutschland (www.fvv-net.eu)