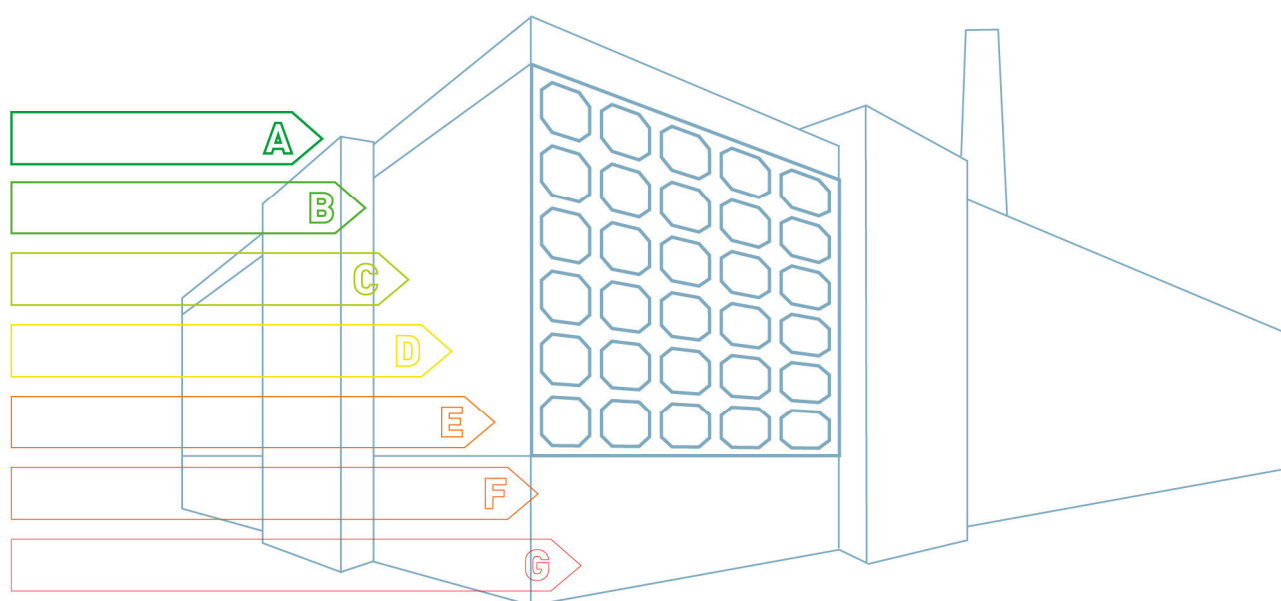




## Gasmotor der Zukunft



## VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

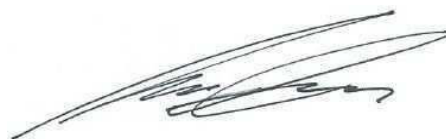
Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage [www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at) zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Energie der Zukunft“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!



Theresia Vogel  
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds



Ingmar Höbarth  
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

## Inhalt

Kurzfassung .....	2
Abstract .....	3
1. Einleitung.....	4
2. Schwerpunkte und Ziele .....	5
3. Zeitplanung und Inhalte .....	6
4. Beschaffung und Aufbau eines Forschungsmotors.....	7
5. Experimentelle Ergebnisse .....	11
6. Berechnungen und Studien zu Strömung und Verbrennung .....	12

## **Kurzfassung**

### **Ausgangssituation und Motivation**

Erdgas wird bis 2030 gemäß der OECD/IEA ca. 30% des Energiebedarfs der Welt abdecken. Abgesehen von den großen vorhandenen Ressourcen ist die Nutzung von Erdgas aus ökonomischer und ökologischer Sicht attraktiv. Dies gilt im Besonderen für das Segment der dezentralen Energieversorgung (Strom bzw. Strom & Wärme), in dem größtenteils Kolbenmotoren der Leistungsklasse 0.5 - 5MW zum Einsatz kommen.

Besondere Vorteile solcher Anlagen sind der hohe energetische Wirkungsgrad und die niedrigen Schadstoffemissionen. Aus ökologischer Sicht ist des Weiteren der vermehrte Einsatz von Biogasen gefordert, der besonders bei dezentralen, stationären Anlagen favorisiert wird.

Zu der Forderung nach einer Reduktion des Primärenergieverbrauchs kommen jene nach Emissionsgrenzwerten. Für stationäre Großmotoren sind die Grenzwerte länderspezifisch geregelt. Trotzdem muss man weltweit mit einer Verringerung der Grenzwerte rechnen. In den USA, z.B., sind die für 2015 vorgeschriebenen Grenzwerte für NOx auf 25% des derzeit in Österreich gültigen Grenzwertes gesetzt (TIER 4 verglichen mit TA Luft).

### **Inhalte und Zielsetzung**

Die Ziele des Projektes sind, den energetischen Wirkungsgrad um 4 %-Punkte von 44% auf 48% und den Mitteldruck von 20 bar auf 27 bar zu erhöhen. Der Mitteldruck charakterisiert die Leistungsdichte von Motoren. Die Ausgangswerte beziehen sich dabei auf derzeit gängige Technologien. Die Verbesserungen werden durch den Einsatz neuer Technologien in den Bereichen Aufladung, Gemischaufbereitung, Zündung, Verbrennungsverfahren, Steuerung und Sensorik angestrebt. Einen Schwerpunkt bildet die Adaption dieser Technologien auf die speziellen Eigenschaften von Biogasen.

### **Methodische Vorgehensweise**

Die Entwicklungsarbeiten werden auf einem Forschungsmotor durchgeführt. Des Weiteren setzt man, wo immer möglich, auf Computersimulationen. Dies betrifft Grundlagenuntersuchungen, die Auslegung der Versuchsträger und die Vorbereitung, Analyse und Auswertung aller Versuche.

### **Erweiterte Ergebnisse**

Die experimentellen und theoretischen Arbeiten sind sehr grundlagenorientiert, daher sind die Ergebnisse und neuen Erkenntnisse auch in anderen Projekten von Nutzen.

## **Abstract**

### **Starting point and Motivation**

With reference to OECD/IEA, natural gas will cover 30% of the worldwide energy demand by 2030. Besides of the available resources, natural gas is attractive from economical and ecological points of view. This particularly applies to peripheral energy supply plants (electricity and optional heat). In this sector primarily piston engines of the class 0.5 – 5MW are used.

The advantages of such engines are their high energetic efficiency at low harmful combustion emissions. Furthermore, ecological considerations also favour the use of biogenic gases which could be made attractive for stationary plants.

Besides of the economical use of primary energy, legal emission limits demand to successively reduce the harmful combustion emissions of such engines. Even though the emission limits of stationary engines are regulated by various national directives, stringent reductions of the limits will be applied all over the world. As an example, USA will introduce NO<sub>x</sub> limits in 2015 which are set to 25% of the current limit in Austria (TIER 4 compared to TA Luft).

### **Contents and objectives**

The objectives of the project are to increase the energetic efficiency by approximately 4%-points from 44% to 48% and the mean effective pressure from 20 bar to 27 bar. The mean effective pressure characterizes the energy density of engines. The baseline values refer to today's state of technology. The improvements will be made by the application of new technologies in the fields of charging, mixture preparation, ignition, combustion concepts, control and sensor technology. Special emphasis is laid on the adaptation of these technologies to the special characteristics of biogenic gases.

### **Methodical approach**

The development work will be carried out on a research engine. Furthermore, computer simulations are emphasized wherever possible. This refers to the layout of the test engine, the preparation of tests and the analysis of results.

### **Extended results**

The experimental and theoretical work refers to basic research topics. Therefore, the results and new findings can be of use in other projects.

## 1. Einleitung

Ziel dieses Forschungsprojekts war die Verbesserung von Groß-Gasmotoren in Hinblick auf deren energetischen Wirkungsgrad, die Leistungsdichte und die Schadstoffemissionen.

Solche Motoren gewinnen zunehmend an Bedeutung. Gemäß der OECD/IEA wird Erdgas bis 2030 ca. 30% des Energiebedarfs der Welt abdecken. Abgesehen von den großen vorhandenen Ressourcen ist die Nutzung von Erdgas aus ökonomischer und ökologischer Sicht attraktiv. Dies gilt im Besonderen für das Segment der dezentralen Energieversorgung (Strom bzw. Strom & Wärme), in dem großteils Kolbenmotoren der Leistungsklasse 0.5 – 5 MW zum Einsatz kommen. Aus ökologischer Sicht ist des Weiteren der vermehrte Einsatz von Gruben- und Biogasen gefordert (wegen ihrer hohen inertem Anteile allgemein als „Schwachgase“ bezeichnet). Der Einsatz solcher Gase wird besonders bei dezentralen, stationären Anlagen favorisiert.

Zu der Forderung nach einer Reduktion des Primärenergieverbrauchs kommen jene nach Emissionsgrenzwerten. Für stationäre Großmotoren sind die Grenzwerte länderspezifisch geregelt. Trotzdem muss man weltweit mit einer Verringerung der Grenzwerte rechnen. In den USA sind die für 2015 vorgeschriebenen Grenzwerte für NO<sub>x</sub> auf 25% des derzeit in Österreich gültigen Grenzwertes gesetzt (TIER 4 verglichen mit TA Luft<sup>1</sup>).

An diesem Projekt arbeiteten drei Partner, die sich optimal ergänzten:

Der Antragsteller, AVL List GmbH, ist das weltweit größte private und unabhängige Unternehmen für die Entwicklung von Antriebssystemen mit Verbrennungsmotoren und Mess- und Prüftechnik. AVL entwickelt und verbessert alle Arten von Antriebssystemen als kompetenter Partner der Motoren- und Fahrzeugindustrie. Bei den in diesem Projekt zu entwickelnden Gasmotoren handelt es sich um Großmotoren, für die bei AVL ein eigener Geschäftsbereich existiert.

Partner P1 ist das Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien. Dieses Universitätsinstitut besitzt große Erfahrung sowohl bei der Anwendung von alternativen Kraftstoffen als auch auf den Gebieten der Brennverfahrensentwicklung, Gemischaufbereitung und Entwicklung von angepassten Zündsystemen (Laserzündung). Neben den Arbeiten auf den Motoren- und Fahrzeugprüfständen bildet die Computersimulation im Bereich der Motorprozessrechnung (1D-Simulation) und der Strömungssimulation (3D-CFD) einen weiteren Schwerpunkt der Aktivitäten.

---

<sup>1</sup> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz  
(Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), 24. Juli 2002

Partner P2 ist die Firma Kostwein Maschinenbau GmbH. Dieses Unternehmen verfügt über umfassende Möglichkeiten und Erfahrungen im Bereich der mechanischen Bearbeitung von Maschinenbauteilen. Erfahrung und Know-how hat Kostwein unter anderem bei Bearbeitungstechnologien von komplexen Prototypen für Großmotoren.

Das Projekt dauerte von April 2008 bis März 2011. AVL konstruierte und baute einen speziellen Forschungsmotor, auf dem eine Reihe von Entwicklungen und Studien durchgeführt wurden. Das Institut der TU Wien (Partner P1) konzentrierte sich auf Computersimulationen im Bereich Thermodynamik und CFD. Partner P2 fertigte eine Reihe von Spezialteilen für den Forschungsmotor.

## 2. Schwerpunkte und Ziele

Bei Projektbeginn wurden folgende Schwerpunkte und Ziele formuliert:

- (1) Steigerung des thermischen Wirkungsgrades
- (2) Steigerung der Leistungsdichte bzw. des Mitteldrucks
- (3) Schadstoffemissionen entsprechend TA Luft
- (4) Optimierung der Verbrennungsstabilität von Schwachgasen

Die folgenden Ziele wurden tatsächlich erreicht:

- (ad 1) Ein innerer (indizierter) Wirkungsgrad des Forschungsmotors von über 48% konnte dargestellt werden.
- (ad 2) Der höchste indizierte Mitteldruck betrug 30 bar. Die Kombination von höchstem Wirkungsgrad und höchster Leistungsdichte ist leider nicht möglich da unterschiedliche Brennverfahren für diese beiden Ziele notwendig sind.
- (ad 3) Die Ergebnisse (1) und (2) beziehen sich auf  $\text{NO}_x$  Emissionen entsprechend TA Luft ( $0.5 \text{ g/m}_N^3 \text{ NO}_x$  bei 5%  $\text{O}_2$  im Abgas). Reduziert man die  $\text{NO}_x$  Emissionen auf die Hälfte des TA Luft Wertes, so verschlechtert sich dadurch der thermische Wirkungsgrad um ca. 1% bis 2%-Punkte.
- (ad 4) Die Verwendung von Schwachgasen bedingt grundsätzlich keine Verschlechterung der Verbrennungsstabilität. Das Luft-Kraftstoff Verhältnis ist dem Inertgasanteil genau anzupassen. Prinzipiell sind Schwachgase gleich wie rückgeführtes Abgas zu behandeln (EGR – Exhaust Gas Recirculation).

### 3. Zeitplanung und Inhalte

Das Projekt startete im 2. Quartal 2008 und dauerte 3 Jahre. Zu Beginn wurde ein spezieller 1-Zylinder Forschungsmotor konstruiert und die Teile gefertigt bzw. beschafft.

Berechnungen der Thermodynamik (Motorprozess und 1-dimensionale Strömung in den Rohren und Behältern des Prüfstandaufbaus) und Strömung (CFD – Computational Fluid Dynamics – 3-dimensionale Strömung mit Verbrennung im Brennraum und den Ein- und Auslasskanälen) wurden zunächst für die Auslegung des Motors gemacht. In weiterer Folge verwendete man verschiedene Modelle für Parametervariationen, für die Analyse von Messergebnissen, für Hochrechnungen auf Vollmotoranwendungen und für die Extrapolationen auf andere Motorbetriebszustände.

Nach der Beschaffung der Teile wurde der Motor zunächst in einer Montagehalle zusammengebaut und danach in einem Prüfstand bei AVL aufgebaut. Die Adaptierung eines Forschungsmotors, insbesondere eines Groß-Gasmotors, an die Peripherie eines Prüfstands ist sehr aufwändig. Dies betrifft seine Anbindung an –

- die Luftversorgung (Aufladung und Konditionierung der Ansaugluft erfolgt über den Prüfstand),
- die Gasversorgung (Erdgas und Beimischung von Inertgasen zur Darstellung von Schwachgasen)
- das System zur Abgasrückführung (EGR - Exhaust Gas Recirculation) bestehend aus einem Kompressor und zwei Kühlern (vor und nach Kompressor)
- das Abgassystem (Pulsations- und Schalldämpfer, Gegendruckklappe)
- die Einbindung aller Mess-Sensoren inkl. Datenerfassung und Speicherung
- die Einbindung in die Motorsteuerung am Prüfstand.

Darüber hinaus benötigt man für den Betrieb eines Gasmotors umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen wie Rückschlagventile, Explosionsklappen, Gasdetektoren und spezielle Betriebsstrategien für das Starten und Abstellen des Motors.

Die Motorversuche wurden gegen Ende des Projektes durchgeführt.

Parallel zu diesen Arbeitspaketen wurde in einem von „Gasmotor der Zukunft“ unabhängigen Projekt eine neue Laser-Zündanlage entwickelt und beschafft. Gegenüber herkömmlichen Zündsystemen ermöglicht die Laserzündung die Verlagerung des Zündortes weiter ins Zentrum des Brennraums und mehrere Zündungen pro Arbeitsspiel. Diese Optionen und deren Auswirkungen auf die Verbrennung wurden an diesem Forschungsmotor getestet.



#### 4. Beschaffung und Aufbau eines Forschungsmotors

AVL verfügt über langjährige Erfahrung in der Konstruktion und Entwicklung von 1-Zylinder Forschungsmotoren. Solche Motoren bestehen aus einem Grundmotor an den jeweils ein Zylinder von speziellen Motoren (meist Serienmotoren) adaptiert wird. Somit lassen sich damit spezifische Entwicklungen (z.B. Brennverfahren) und Grundlagenforschung (z.B. Schadstoffbildung, Klopfen) hinsichtlich der innermotorischen Verbrennung relativ einfach durchführen weil die Randbedingungen, wie z.B. Ladedruck und Abgasgegendruck, flexibel einstellbar sind und Veränderungen an Bauteilen nur an einem Zylinder vorgenommen werden (Verdichtungsverhältnis, Brennraumgeometrie, Ventil-Steuerzeiten, Einspritzdüsen). Prinzipbedingt kann man daher an einem 1-Zylinder Motor die Charakteristiken, die den gesamten Motorprozess eines Mehrzylindermotors beinhalten, nicht messen (wie etwa den effektiven thermischen Wirkungsgrad, da dieser die Turboaufladung, Abgasrückführung, Reibung, Antriebsleistung für Kraftstoffsystem, Steuertrieb, Kühlung etc. beinhaltet). Aus diesem Grund werden die Ergebnisse von 1-Zylinder Motoren immer versuchsbegleitend auf spezielle Mehrzylindermotoren hochgerechnet.

Im 1. Projektjahr konzentrierte man sich auf die Konstruktion des Grundmotors. Danach erfolgte die Adaptierung eines Serienmotors. Dies betrifft die Konstruktion und Berechnung des Zylinderblocks (Aufnahme Zylinderbuchse, Öl- und Kühlwasserführung, Aufnahme Zylinderblock, Nockenwellengehäuse) sowie der Kurbelwelle, der Nockenwelle und des Ventiltriebs.

Für diesen nunmehr speziell konzipierten Einzylinder Forschungsmotor wurden schließlich die Versuchsteile für die eigentlichen Forschungsarbeiten ausgelegt und beschafft. Dies sind verschiedene Brennraumgeometrien, Ventilsteuerzeiten, Zündsysteme und Brennverfahren (offene Brennräume, Vorkammer).

Die Abb. 1 zeigt den Forschungsmotor auf einem Prüfstand der AVL in Graz. Im Bild unten sind die Versorgungstanks für die Inertgase zu sehen.

Die Versorgung des Erdgases erfolgte über das öffentliche Gasnetz. Zur genauen Einstellung einer gewünschten Methanzahl wurde dem Erdgas Propan zugemischt, das einem weiteren Tank am AVL Werksgelände entnommen wurde (nicht im Bild). Am Prüfstand befindet sich eine Gasmischanlage in der Erdgas, Propan und Inertgas der vorkonditionierten Luft beigemischt wurde. Die Luftversorgung erfolgte über einen Kompressor und eine Konditionieranlage, welche sich im Keller unterhalb des Prüfstands befinden.

Die Abb. 2 zeigt das Laser Zündsystem. Im zylindrischen Gehäuse (rot) wird der Laserstrahl erzeugt. Dieser strahlt im Rohr (siehe kleines Bild), das statt der Zündkerze in den Zylinderkopf eingebaut wird, zu einer Linse aus Saphir welche ihn zu einem Brennpunkt im Brennraum des Motors bündelt und dadurch das Gas-Luft Gemisch zündet.

Abb. 3 zeigt die Anlage zur Abgasrückführung am Prüfstand. Im Bild links unten sind die Luftversorgung zu sehen sowie die drei Leitungen zur Beimischung der Brenngaskomponenten (Erdgas, Propan und Inertgas). Die Beimischung des Abgases zur Ansaugluft erfolgte stromaufwärts der Brenngaszufuhr um einen Kurzschluss von Brenngas in das Abgassystem des Motors (über das Abgasrückführsystem) zu verhindern. Das Abgasrückführsystem besteht aus einem Schraubenkompressor (Drehzahl geregelt) und zwei Kühlern vor und nach dem Kompressor.

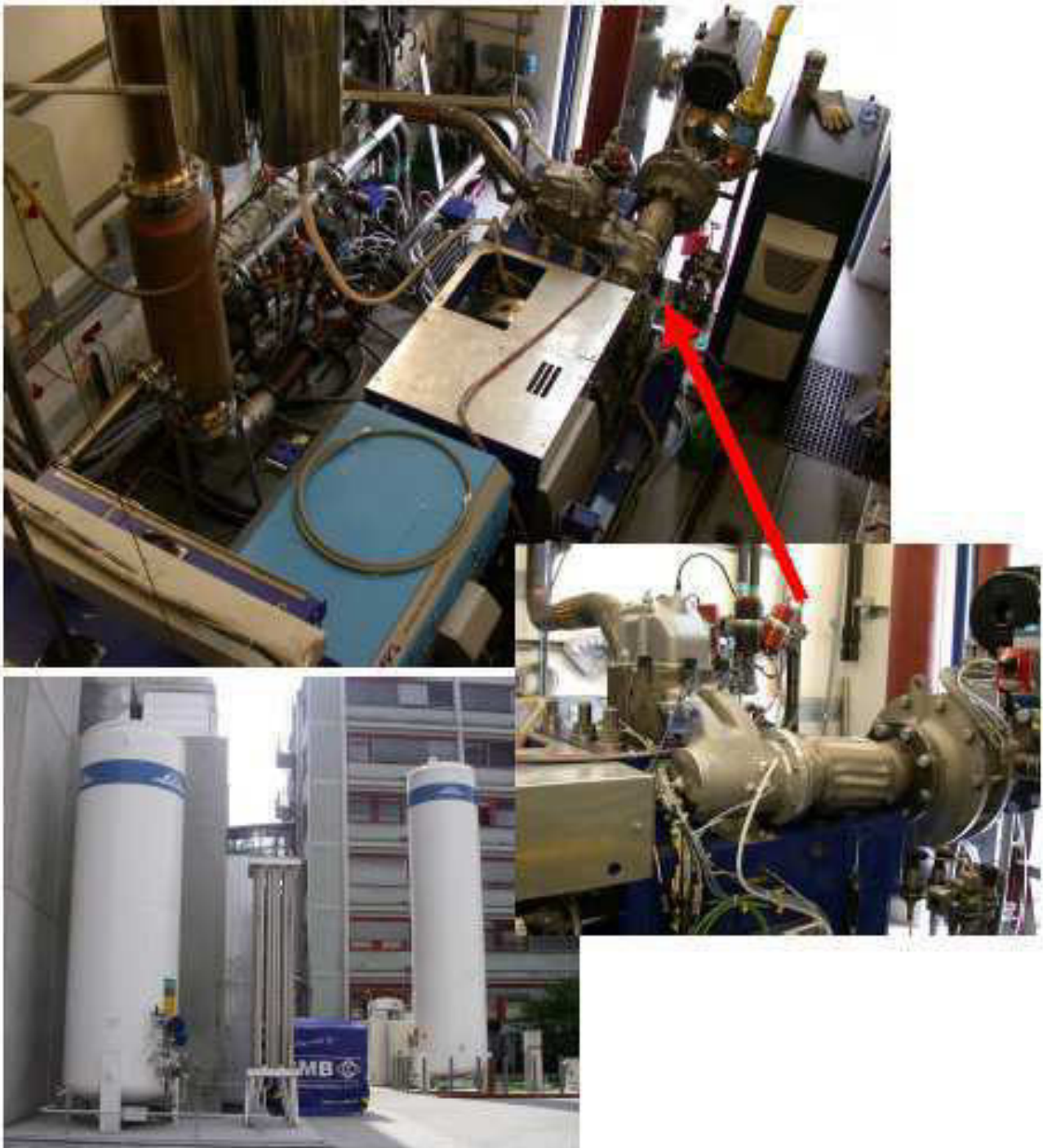


Abb 1: Aufbau des Forschungsmotors am Prüfstand (oben); Ansaugkanal für das Luft-Kraftstoffgemisch und Zylinderkopf (Detail rechts); Versorgungstanks für Inertgase (Bild unten, linker Tank N<sub>2</sub>, rechter Tank CO<sub>2</sub>, in der Mitte der Verdampfer für N<sub>2</sub>)

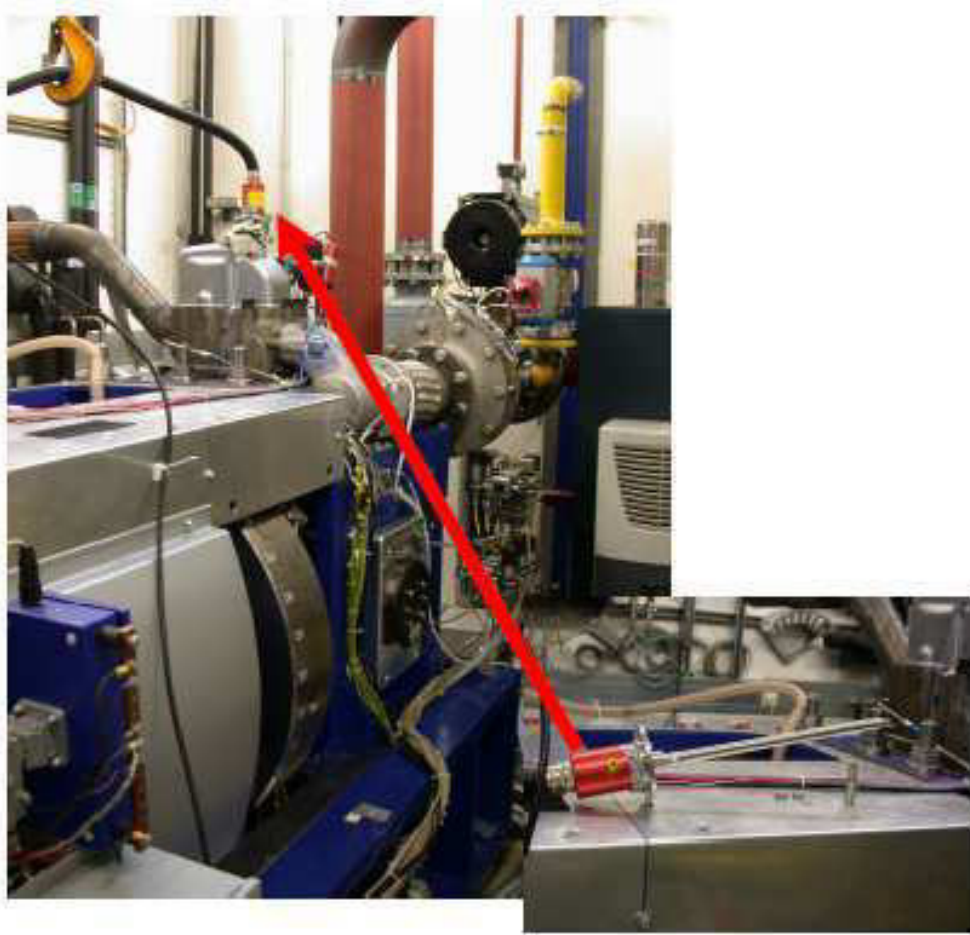


Abb 2: Forschungsmotor mit eingebautem Laserzünder

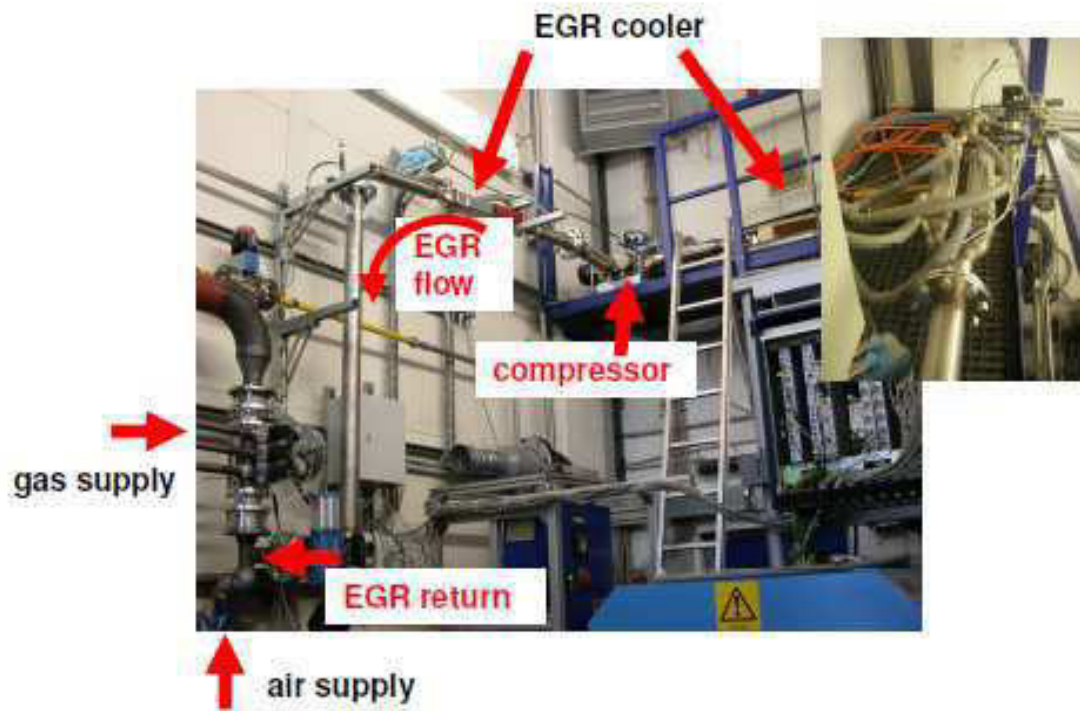


Abb 3: Anlage zur Abgasrückführung am Prüfstand

## 5. Experimentelle Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Technologien sehr detailliert untersucht wie z.B. verschiedene Brennverfahren (offene Brennräume und Vorkammerverfahren), Zündsysteme (Zündkerze und Laserzündung), extreme Abmagerung und Abgasrückführung. Mit allen diesen Technologien wurden vor allem die grundlegenden Charakteristiken des thermodynamischen Prozesses und der Verbrennung analysiert (Reaktionskinetik der Verbrennung hinsichtlich Stabilität, Schadstoffbildung und Klopfen). Ein zentrales Thema bildete die Verbrennung von Schwachgasen.

Die Ergebnisse können folgendermaßen zusammengefasst werden:

### (1) Brennverfahren

Mit offenen Brennräumen konnten die höchsten Mitteldrucke (indizierter Mitteldruck ca. 30 bar) erreicht werden und mit einem Vorkammerverfahren die höchsten thermische Wirkungsgrade (indizierter Wirkungsgrad > 48%). Diese Ergebnisse wurden jeweils unter der Randbedingung von NO<sub>x</sub> Emissionen gemäß TA Luft erreicht (NO<sub>x</sub> < 500 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> bei 5% O<sub>2</sub> im Abgas).

### (2) Zündung

Die Laserzündung wurde mit einer Vorkammerzündkerze verglichen. Durch die niedrigere Zündenergie des Lasers sinkt die Verbrennungsstabilität und damit der maximal erreichbare thermische Wirkungsgrad.

### (3) Absenken der NO<sub>x</sub> Emission

Es wurden die Auswirkungen einer Absenkung auf die Hälfte des TA Luft Wertes untersucht. Reduziert man NO<sub>x</sub> durch Abmagerung auf ca. 250 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>, verschlechtert sich dadurch der thermische Wirkungsgrad um ca. 1%-Punkt da die Verbrennungsstabilität abnimmt. Erzeugt man die gleiche NO<sub>x</sub> Absenkung durch Abgasrückführung, so bleibt die Verbrennung stabiler, es kommt aber ebenfalls zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades.

### (4) Die Verbrennung von Schwachgasen

Die Verbrennung von Schwachgasen wurde sehr ausführlich und systematisch untersucht. Dabei kam man zum Ergebnis, dass grundsätzlich die Verwendung von Schwachgasen bei entsprechender Adaption des Brennverfahrens keine Verschlechterung der Verbrennungsstabilität verursacht. Prinzipiell sind Schwachgase gleich wie rückgeführtes Abgas zu behandeln.

## 6. Berechnungen und Studien zu Strömung und Verbrennung

In der ersten Projektphase wurde in AVL-BOOST ein Ein-Zylinder-Simulationsmodell erstellt, um den Prüfstands Aufbau im Bereich der Ladeluft- und Abgasleitungen festzulegen.

Die Prozessrechnung wurde in erster Linie genutzt um die Rohrdurchmesser und Behältervolumina zu dimensionieren. Es sollte sichergestellt werden, dass die Druckschwankungen im Bereich der Methan-Einblasung eine definierte Amplitude nicht übersteigen und damit eine präzise Beimischung des Brennstoffes erfolgt. Zudem sollten die Druckschwankungen in den Ladeluft- und Abgasleitungen aus Gründen der Festigkeit generell unterhalb eines Grenzwerts liegen, was durch die rechnerische Auslegung von Ausgleichsbehältern und die Dimensionierung der Rohrdurchmesser realisiert wurde.

In weiterer Folge wurden Rechengitter mit den Software-Codes AVL-FIRE und STAR-CD mit dem Ziel einer prädiktiven Berechnung des Verbrennungsprozesses aufgebaut.

Auf Basis der abgestimmten Verbrennungsmodelle wurden Strömungs- und Verbrennungssimulationen durchgeführt, die zum Ziel hatten, die Geometrie der Brennkammer und dabei insbesondere die Kolbengeometrie so zu gestalten, dass unter der Voraussetzung niedrigster Stickoxid-Emissionen ein Verbrennungsprozess mit höchster Effizienz realisiert werden kann. Abb. 4 zeigt die numerisch untersuchten Kolbengeometrien.

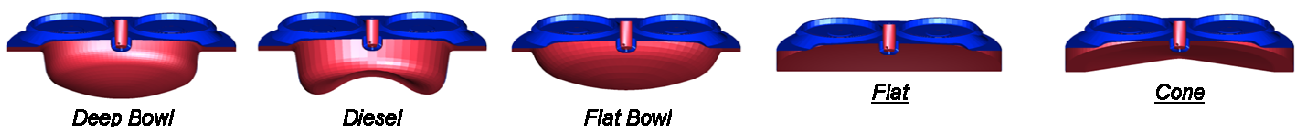


Abb 4: Untersuchte Kolbengeometrien

Die eingesetzten phänomenologischen Modelle zur Beschreibung der Stickoxid-Emissionen und der klopfenden Verbrennung, die wichtige Randbedingungen für die Prozessoptimierung darstellen, haben den prinzipiellen Nachteil, dass sie auf die jeweilige Anwendung kalibriert werden müssen und dann nur in einem engen Betriebsbereich ihre Gültigkeit behalten. Insbesondere für die vorliegende extrem magere Verbrennung sind diese Modelle nur begrenzt einsetzbar. In den dargestellten Untersuchungen zur Kolbengeometrie wurde deshalb die Zusammensetzung der Zylinderladung stets konstant gehalten. Für eine weitere Effizienzsteigerung ist eine Betrachtung des Verbrennungsprozesses für unterschiedliche Ladedrücke, Luftverhältnisse und Restgaskonzentrationen erforderlich. Daraus lässt sich die Anforderung detaillierter Modelle für die Stickoxid-Emissionen und die klopfende Verbrennung ableiten.

Gegen Ende des Projektes konzentrierte man sich auf Berechnungen mit komplexen reaktionskinetischen Modellen und analysierte die Abläufe von regulären und klopfenden Verbrennungsreaktionen. Deutliche Unterschiede zeigten sich dabei bei den für die Hochtemperatur-Oxidation maßgeblichen OH-Radikalen, siehe Abb. 5. Während bei der normalen Verbrennung die OH-Radikale nur in der Flammenfront existieren und diese entsprechend der Flammenoberfläche zunehmen, kommt es bei der klopfenden Verbrennung zu einem schlagartigen Anstieg dieser Spezies. Der gesamte Kraftstoff wird innerhalb weniger Grad-Kurbelwinkel umgesetzt. Die OH-Radikale sind dann stark im Überschuss und werden nicht vollständig durch die Verbrennung abgebaut. Im Anschluss an die Kraftstoffumsetzung nehmen die OH-Radikale durch Rekombinationsprozesse nur langsam ab.

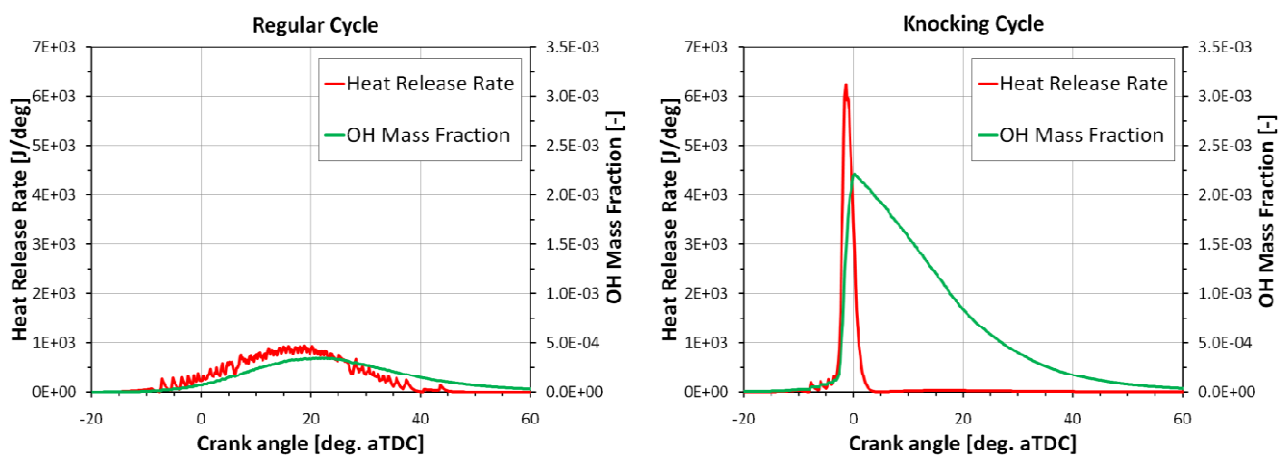


Abb 5: Gegenüberstellung der Wärmefreisetzung und OH-Radikalbildung für einen regulären Zyklus (links) und bei klopfender Verbrennung (rechts)

#### Publikationen:

- [1] Lauer, T.; Pizzirani, N.; Murakami, S.: Computational study on the combustion concept of a lean burn gas engine. 10th Congress Engine Combustion Processes, München, 2011
- [2] Pizzirani, N.; Lauer, T.: Computational Optimization of the Efficiency of a Large Gas Engine. AST User Conference, Graz, 2011
- [3] Pizzirani, N.; Lauer, T.: Numerical Method to Optimize the Efficiency of a Large Gas Engine. 6. Internationale MTZ-Fachtagung „Heavy-Duty-, On- und Off-Highway-Motoren“, Kiel, 2011 (Abstract angenommen)

#### Dissertation:

Laufende Dissertation von Hrn. Niccoló Pizzirani im Bereich „Verbrennung Gasmotoren“

## IMPRESSUM

### **Verfasser**

AVL LIST GMBH  
Hans-List-Platz 1, 8020 Graz  
Telefon: +43 316 787  
Fax: +43 316 787  
E-Mail: [info@avl.com](mailto:info@avl.com)  
Web: [www.avl.com](http://www.avl.com)

Helmut List  
E-Mail: [helmut.list@avl.com](mailto:helmut.list@avl.com)

### **Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber**

Klima- und Energiefonds  
Gumpendorfer Straße 5/22  
1060 Wien  
[office@klimafonds.gv.at](mailto:office@klimafonds.gv.at)  
[www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at)

### **Disclaimer**

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

### **Gestaltung des Deckblattes**

ZS communication + art GmbH