

Jahresbericht 2003, 22. Januar 2004

# Projekt Nr. 47336

## Darstellung des Technologiepotentials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO<sub>2</sub> Ausstoss

Autor und Koautoren	P. Wilhelm, A. Bertola, K. Boulouchos
beauftragte Institution	ETH Zürich, Institut für Energietechnik, Lab. Für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme
Adresse	ETH Zentrum, CLA F1, 8092 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	01 632 46 19, wilhelm@lav.mavt.ethz.ch, www.lav.ethz.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	Projekt-Nr. 47336 / Verfügung-Nr. 87435
Dauer des Projekts (von – bis)	1. August 2002 – 31. Juli 2005

### ZUSAMMENFASSUNG

Die diesjährigen Arbeiten an diesem Projekt umfassen vor allem die Implementierung eines am LAV entwickelten Modells der Russbildung in der dieselmotorischen Verbrennung mittels 3-D Rechnung (*StarCD*). Da der neue LIEBHERR Motor noch nicht zur Verfügung (Verzögerung der Lieferung) stand wurden die Simulationen mit einem 1-Zylinder 1-Liter Medium Duty Common Rail Dieselmotor durchgeführt. Die ersten Resultate sehen ermutigend aus, müssen aber im Moment als eher vorläufig betrachtet werden, da entsprechende Messdaten welche die räumliche Verteilung wiedergeben nicht vorhanden sind. Jedoch sind die Emissionen bei Auslass-Öffnen in guter Übereinstimmung mit den Resultaten aus dem 0D-Simulationstool, für welches das Russmodel ursprünglich entwickelt wurde und ebenfalls mit den Emissionsdaten aus den Messungen im Auslasssystem des Motors.

Weiter wurde eine Literaturstudie zur Voruntersuchungen für die Gasentnahmetechnik durchgeführt. Mit der Konstruktion selbst wurde gerade begonnen mit dem Ziel anfangs Juni 2004 die ersten Probemessungen durchzuführen.

Der neue LIEBHERR Vierzylinder Motor mit Vierventilkopf, Pumpe-Leitungs-Düse Einspritzsystem und interne Abgasrückführung (D 934L, erfüllt die „off-road“ Emissionsstufe TIER 3 NOx+HC=4 g/kWh, PM=0.2 g/kWh) wird voraussichtlich Ende Mai auf dem Prüfstand des LAV laufen. Es soll eine Bestandesaufnahme gemacht werden, welche das Potentials des für die Tier 3 Abgasnorm zertifizierten Motors bezüglich der kommenden Norm Tier 4 darstellen soll. Dabei werden Variationen von AGR – Technik, Aufladung, Injektoren (Geometrie), Ventilsteuerzeiten (Nockenwellenprofil), Brennraum (Form der Kolbenmulde) und Einspritzverlauf in Betracht gezogen.

Im Bereich der Messtechnik und Abgasanalytik wird mit der EMPA zusammengearbeitet. Erste Koordinationsgespräche haben stattgefunden und die Abgasanalytik ist in Vorbereitung.

## Projektziele

Dieses Projekt soll eine Bestandesaufnahme eines Medium Duty Diesel Motors mit Vierventilkopf, Pumpe-Leitungs-Düse Einspritzsystem und interne Abgasrückführung (D 934L), welcher für die Abgas-norm TIER 3 (siehe Tab. 1) zertifiziert ist darstellen um das Potential bezüglich der kommenden Abgasvorschrift TIER 4 (siehe Tab. 1) zu eruieren. Dabei werden Variationen von:

- AGR – Technik (intern bzw. extern)
- Aufladung
- Injektoren (Geometrie)
- Ventilsteuерzeiten (Nockenwellenprofil)
- Brennraum (Form der Kolbenmulde)
- Einspritzverlauf

in Betracht gezogen. Die Bestandesaufnahme und Verbrennungsoptimierung für TIER 4 (siehe Tab. 1) wird sowohl am Prüfstand als auch mittels Simulation gemacht. Die Emissionswerte der TIER Abgasnorm werden mit einem Stufentest ermittelt. Dabei wird der Motor bei verschiedenen Drehzahlen und Lasten wie sie in Fig. 1 dargestellt sind, betrieben. Die entsprechenden spezifischen Emissionen werden zusammengezählt und gewichtet.

Norm	Einführungszeitpunkt	NOx [g/kWh]	PM [g/kWh]
Tier 2	2003	6.0	0.2
Tier 3	2006	3.5	0.2
Tier 4	2011	0.35	0.02

Tab. 1: Vergleich der Emissionsnormen für Off – Road Dieselmotoren, jetzt und in Zukunft.

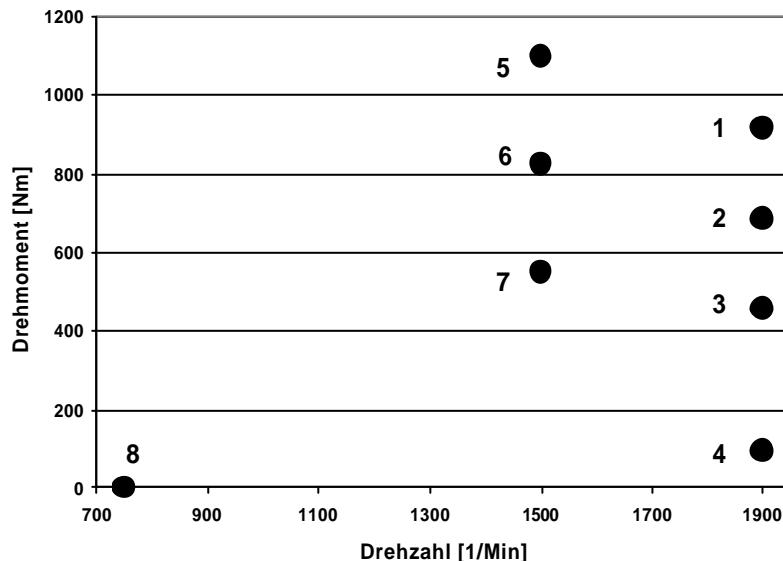


Fig. 1: Belastungspunkte für den LIEBHERR D 934 L Motor. Die Punkte 1-3 und 8 werden mit 0.15, die übrigen Punkte mit 0.1 gewichtet.

Um zeitlich und räumlich aufgelöste Messungen, vor allem des Russes zu erhalten, soll ein Entnahmesystem entwickelt werden, welches ermöglicht, während dem Verbrennungsvorgang Proben direkt aus dem Zylinder zu entnehmen und zu analysieren.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### Entwicklung des Gasentnahmesystems

Es gibt nur sehr wenige kommerziell erhältliche Gasentnahmesysteme. Die sind unseren Anforderungen aber noch nicht gewachsen, da sie vor allem für Ottomotoren entwickelt wurden und somit nicht für so hohe Drücke abdichten können und vor allem für Russmessungen ungeeignet sind. Es wurde also entschieden ein solches System selbst zu entwickeln. Dabei soll der Trade – Off zwischen kurzer Öffnungsduer und der gewonnenen Probemasse optimiert werden.

Für das Entnahmesystem wurde zuerst eine ausführliche Literaturstudie durchgeführt [4-9]. Es hat sich gezeigt, dass im Zeitraum der letzten 20 Jahre verschiedenste Ideen in diese Technik eingeflossen und realisiert worden sind. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Typen von Ventilen, Nadel- und Tellerventile. Für dieses Projekt kommen grundsätzlich beide Typen in Frage. Ebenfalls gibt es verschiedene Typen von Aktuatoren, elektromagnetische und hydraulische, wobei die hydraulischen Aktuatoren mit elektromagnetischen Ventilen angesteuert werden. Die Ansteuerung eines hydraulischen Aktuators ist aufwändiger im Vergleich zu einem reinen elektromagnetischen Aktuator, jedoch können mit der Hydraulik grössere Kräfte aufgebracht werden. Bei der Öffnungsduer, die für uns eine entscheidende Grösse ist, liegen beide Varianten im selben Rahmen von 1ms bis 3ms. Da an unserem Labor ein ausführliches Know-how im Bereich der Common – Rail Technik besteht, wurde beschlossen, den Bewegungsmechanismus eines Common Rail – Injektors in das Gasentnahmeverteil einzubauen. Die Ähnlichkeit von bereits verwendeten Entnahmevertilen elektromagnetischer Bauweise mit einem standard Common Rail Injektor ist in den Fig. 2a bis Fig. 2c zu erkennen. Der zusätzliche Kraft und Beschleunigungsvorteil den wir uns aus dem mit Common Rail Technologie angetriebenen Entnahmeverteil gewinnen soll eine verkürzte Entnahmedauer mit genügend grosser Probenmasse ermöglichen. Von einem Aktuator mit Common Rail Technologie kennen wir bereits die mögliche Bewegungscharakteristik und vorhandene Steuereinheiten können übernommen werden. Ebenfalls ist es nicht von ausserordentlicher Notwendigkeit, bei der Konstruktion der beweglichen Teile auf geringes Gewicht zu achten. Mit einem bereits vorhandenen vergleichbaren Mechanismus kann die Öffnungsduer theoretisch bis auf 0.6ms verkürzt werden, was jedoch mit einer Einbusse in den gewonnenen Probenvolumen bezahlt wird.

Von bereits bestehenden Varianten erhielten wir Konstruktionszeichnungen, die uns bei der Ausarbeitung unseres Systems Anhaltspunkte geben, was schon einmal funktioniert hat. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird die definitive Konstruktion anfangs 2004 beginnen um dann Mitte Jahr erste motorische Tests mit dem Gasentnahmesystem durchführen zu können.

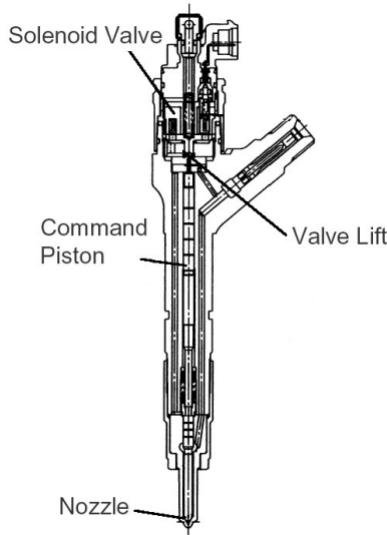


Fig. 2a: Standard Common Rail  
Injektor

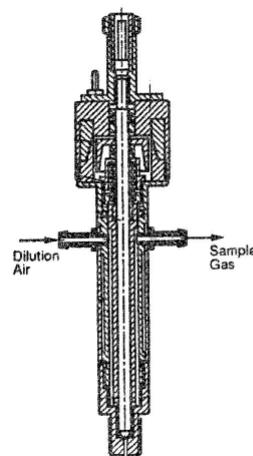


Fig. 2b: Elektromagnetische  
Entnahmesonde wie sie in [6]  
verwendet wurde.

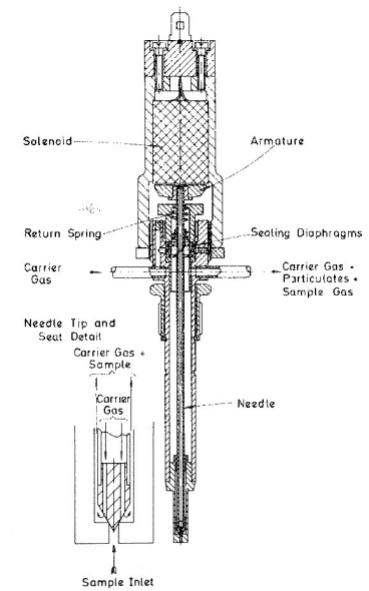


Fig. 2c: Elektromagnetische  
Entnahmesonde wie sie in [5]  
verwendet wurde.

## Experimentelle Untersuchungen am Prüfstand

Da der Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor (D 934 L) der Firma Liebherr erst im Frühling geliefert werden kann musste der entsprechende Teil des Projektes im Zeitplan zurück verschoben werden.

## Simulationsergebnisse

Das phänomenologische Modell des 0D-Simulations Tools unseres Labors [1] wurde in die Simulationssoftware *StarCD* implementiert. Das Modell besteht aus einem Bildungs- (Gl. 2) und einem Oxidationsterm (Gl. 3) die zusammen die Änderungsrate der Russmasse (Gl. 1) beschreiben. Ebenfalls mitberücksichtigt wird die Tatsache, dass Russ nur in einem bestimmten Temperatur-Lambdafeld gebildet wird [10].

$$\frac{dm_{Soot}}{d\mathbf{j}} = \frac{dm_{Soot, form}}{d\mathbf{j}} - \frac{dm_{Sootox}}{d\mathbf{j}} \quad 1)$$

$$\frac{dm_{Soot, form}}{d\mathbf{j}} = A_{form} \cdot \frac{dm_{Soot}}{d\mathbf{j}} \Big|_{diffusion} \cdot \left( \frac{p_{cyl}}{p_{ref}} \right)^n \cdot f(T_{Aform}, I_{form}) \quad 2)$$

$$\frac{dm_{Sootox}}{d\mathbf{j}} = A_{ox} \cdot \frac{1}{t_{char}} \cdot (m_{Soot})^{n2} \cdot \left( \frac{p_{O_2}}{p_{O_2, ref}} \right)^{n3} \cdot e^{-\frac{T_{Aox}}{T}} \quad 3)$$

Da für den im Projekt verwendeten Motor noch keine Messergebnisse vorhanden sind, wurde das Modell an einem anderen Motor ausprobiert (1 Zylinder 1lit. Common Rail Motor von Iveco). Dabei wurde wie folgt vorgegangen, die Parameter des Modells wurden mit generischen Algorithmen für eine Reihe von Messpunkten mit 0D-Simulation ermittelt. Weitere Betriebspunkte wurden mit demselben Tool errechnet und dann mit den Messergebnissen verglichen. Dieselben Parameter sind in die 3D-Simulation übernommen worden. Die 3D-Ergebnisse sind somit eher mit den 0D-Ergebnissen zu vergleichen als mit den Messergebnissen, wobei die 0D-Ergebnisse schon gut mit den Messungen übereinstimmen sollten. In Fig. 2 sind exemplarisch die neusten Ergebnisse für einen Betriebspunkt mit drei verschiedenen Einspritzprofilen (Boot, Ramp, Square) dargestellt. Die verschiedenen Profile sind in Fig. 3 dargestellt. Wie die Resultate in Fig. 2 zeigen, wird der Trend der abnehmenden Russemissionen vom Boot- zum Ramp- und Square-Einspritzprofil sowohl von der 0D- als auch von der 3D-Simulation wiedergegeben. Im Vergleich der beiden Simulationsarten zeigen sich zwar Unterschiede, doch sind die Resultate unter Berücksichtigung, dass das Russemissonsmodell in der 3D-Simulation scheinbare lokale Gegebenheiten im Brennraum mitberücksichtigt hingegen bei der 0D-Simulation nicht doch sehr gut. Solche lokalen Phänomene sind in den Schnittdarstellungen der 3D-Simulation in Fig. 4 aufgezeigt. Ebenfalls kann in Fig. 4 die Abhängigkeit der Russemision vom Brennstoff und Temperatur erkannt werden. Wie genau diese Verteilung im Brennraum quantitativ der Realität entspricht, wird sich mit dem Einsatz des zukünftigen Gasentnahmesystems zeigen. Der Sinn, um überhaupt 3D zu rechnen, besteht darin, dass einige Werte, die im 0D-Modell angenähert werden müssen, direkt erhalten werden können. Weiter sind für den Vergleich mit den späteren Entnahmemessungen am Motor die Verteilungen im Brennraum von Interesse.

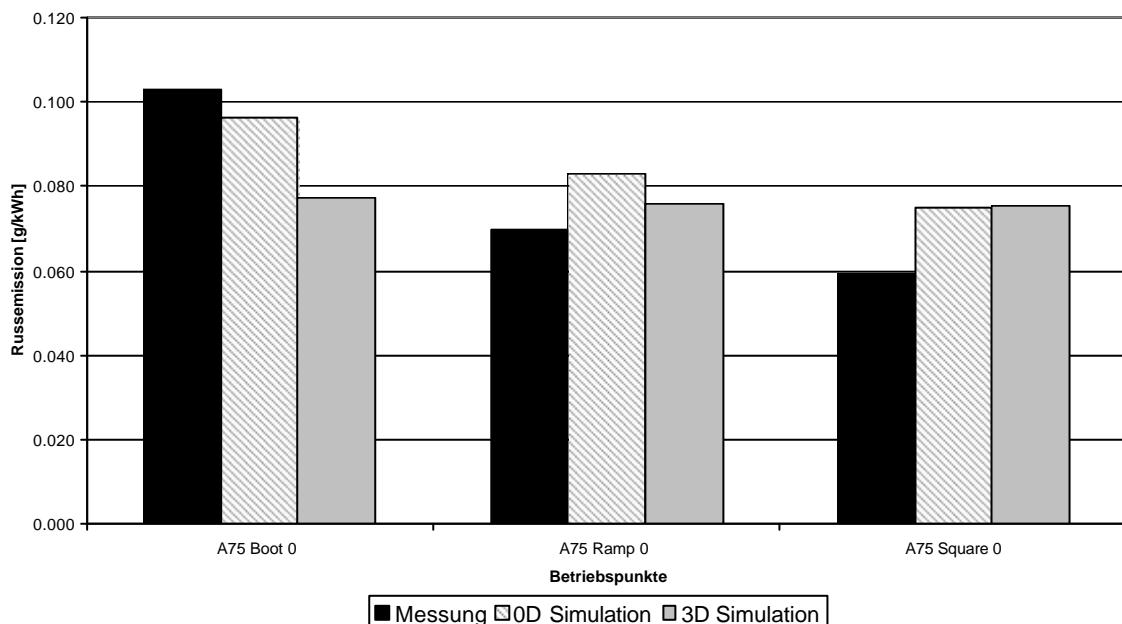


Fig. 2: Vergleich der Russemissionen erhalten aus Messung, 0D- sowie 3D-Simulation für den Betriebspunkt A (1550 U/min) mit 75% Last des IVECO Motors und drei verschiedenen Einspritzprofilen. Der Einspritzbeginn liegt im OT.

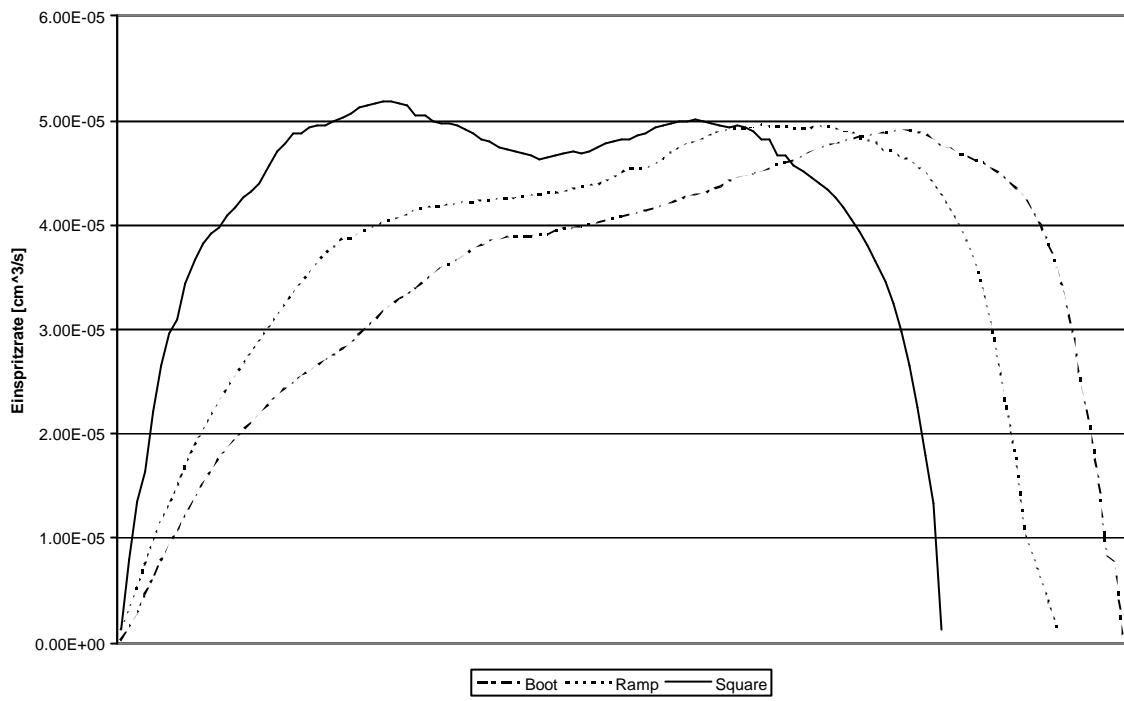


Fig. 3: Die Verschiedenen Einspritzverläufe im Vergleich.

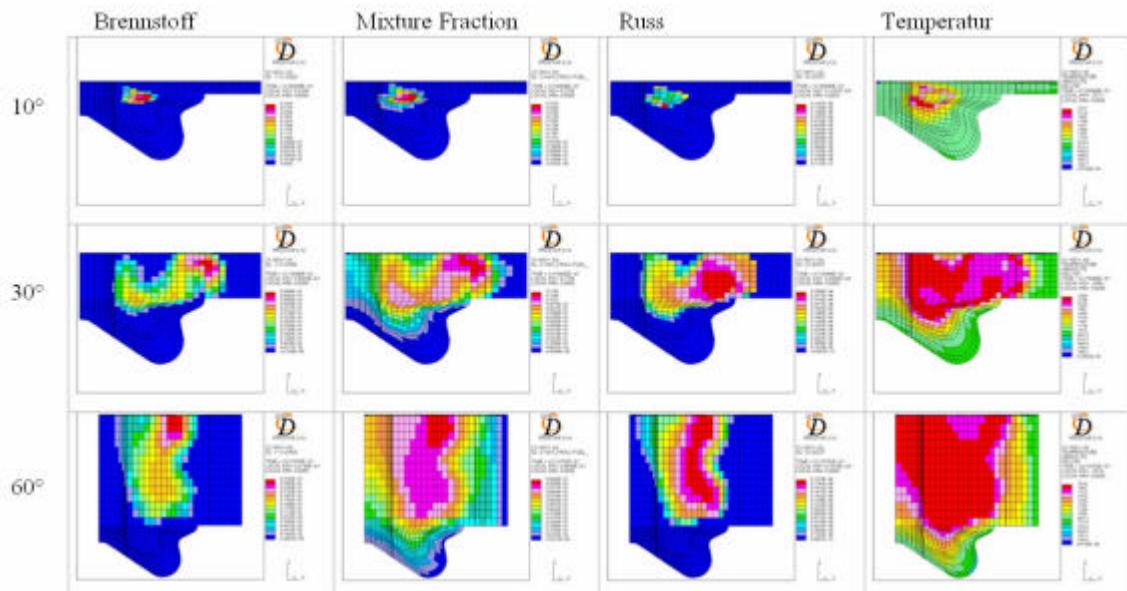


Fig. 4: Senkrechter Schnitt durch den Brennraum in Einspritzrichtung zu drei Verschiedenen Zeiten des A75, Boot 0 Betriebspunktes des IVECO Motors. Die starke Abhängigkeit der Russbildung vom Brennstoff resp. der Mixturefraction (Anteil Brennstoff in der einzelnen Zelle) ist gut ersichtlich.

## Nationale Zusammenarbeit

Zum jetzigen Zeitpunkt beschränkt sich die Zusammenarbeit mit dem Industriepartner LIEBHERR Machines Bulle S.A. auf den Datenaustausch um dann im nächsten Jahr, mit der Lieferung des neuen 4-Ventil, 4-Zylindermotors eng zusammenzuarbeiten. Im Bereich der Messtechnik ist die EMPA (Abteilung Verbrennungsmotoren / Feuerungen) ebenfalls in dieses Projekt involviert. Die Koordination hat bereits stattgefunden und die Messtechnik und Abgasanalytik ist in Vorbereitung.

## Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Aufgrund von Erkenntnissen aus der Literatur wurden für die Konstruktion des Systems einer Gasentnahmesonde möglichst alle Varianten durchgedacht und analysiert. Dies nahm sehr viel Zeit in Anspruch, ist aber in anbetracht der Komplexität des Systems gerechtfertigt, um mögliche Fehler im Voraus auszuschliessen. Erste Konstruktionszeichnungen sind in der Fertigstellung und das System soll ab Mitte 2004 fertig gestellt sein und eingesetzt werden.

Die ersten Resultate des in die 3D-Simulation implementierten Russmodells sind erfreulich. Weitere Tests werden im Laufe des Jahres 2004 folgen um dann auch am neuen Motor angewendet zu werden. Eine weitere Verbesserung im Laufe des nächsten Jahres wird angestrebt. Zusätzlich werden noch Simulationen des Vierzylinder LIEBHERR Motors D934 L mit GT-Power durchgeführt.

Mit der Ankunft des Motors im 2. Quartal 2004, was bezüglich dem geplanten Zeitplan eine nicht unwesentliche Verzögerung darstellt, kann mit den Messungen am Prüfstand erst gegen Jahreshälfte begonnen werden. Damit werden uns weitere Messdaten zur Validierung unserer Simulationsstools zur Verfügung stehen. Am Prüfstand sollen die ersten Motorenvariationen wie unter Kap. Projektziele beschrieben gefahren und geprüft werden.

## Referenzen

- [1] M. Warth, P. Obrecht, T. Koch, K. Boulouchos: **Vorausberechnung von Brennverlauf, NO- und Russemissionen beim Dieselmotor – Optimierung und Validierung eines neuen Ansatzes**, Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors 9. Tagung, TU Graz 25./26. 9. 2003, VKM-THD Mitteilungen, Heft 83, 2003.
- [2] A. Bertola: **Technologies for Lowest NOx and Particulate Emissions in DI-Diesel Engine Combustion - Influence of Injection Parameters, EGR and Fuel Composition**, ETH – Dissertation Nr. 15373, ETH Zürich, 2003
- [3] A. Bertola, R. Li, K. Boulouchos: **Influence of Water-in-Diesel-Emulsions and EGR on Combustion and Exhaust Emissions of Heavy Duty DI-Diesel Engines equipped with Common-Rail Injection Systems**, SAE 2003-01-3146, 2003
- [4] A. Kölmel, U. Spicher, R. Düsterwald, F.M. Wytrykus: **Analysis of Mixture Conditions Close to Spark Plug Location using a Time Resolved Gas Sampling Valve**, SAE 982473, 1998.
- [5] G. Lepperhoff, A. Pungs, S. Pischinger, H. Bäcker: **Analysis of the Particle Size distribution in the Cylinder of a common Rail DI Diesel Engine during Combustion and Expansion**, SAE 2000-01-1999, 2000.

- [6] J.E. Bennethum, J.N. Mattavi, R.R. Toepel: ***Diesel combustion Chamber Sampling – Hardware, Procedures, and Data Interpretation***, SAE 750849, 1975.
- [7] H. Zhao, G. Lowry, N. Ladommatos: ***Time-Resolved Measurements and Analysis of In-Cylinder Gases and Particulates in Compression-Ignition Engines***, SAE 961168, 1996.
- [8] S.R. Norris-Jones, T.Hollis, C.N.F. Waterhouse: ***A Study of the Formation of Particulates in the Cylinder of a Direct Injection Diesel Engine***, SAE 840419, 1984.
- [9] S. Kato, Y. Takayama, G. Takeshi Sato, H. Tanabe: ***Investigation of Particulate Formation of DI Diesel Engine with Direct Sampling from Combustion Chamber***, SAE 972969, 1997.
- [10] K. Akihama, Y. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki, A.M. Dean: ***Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature***, SAE 2001-01-0655, 2001.