

Zwischenbericht 2005, 9. Dezember 2005

# Projekt Nr. 47336

## Darstellung des Technologiepotentials von zukünftigen Dieselmotoren

### Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO<sub>2</sub> Ausstoss

Autor und Koautoren	P. Wilhelm, K. Boulouchos, M. Mohr (EMPA), D. Etissa (EMPA), D. Schreiber (EMPA)
beauftragte Institution	ETH Zürich, Institut für Energietechnik, Lab. Für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme
Adresse	ETH Zentrum, CLA F1, 8092 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	044 632 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. Dezember 2006

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die diesjährigen Arbeiten an diesem gemeinsamen Projekt der ETH Zürich und der EMPA umfassen die Fertigstellung des Gasentnahme Ventils (GEV) und der 3D – Simulation des Versuchsmotors inkl. Russberechnung sowie der Planung und Vorbereitung des Aufbaus von Probenahme und Aufbereitung für die Partikelcharakterisierung.

Das GEV wurde im Verlauf des Jahres fertig gestellt. Bei den ersten Funktionstests haben sich trotz sorgfältiger Planung einige Mängel in der Stabilität des Gerätes herauskristallisiert. Diese Mängel werden derzeit behoben, damit im Anschluss daran umfangreiche Testmessungen zur Funktion des GEV durchgeführt werden könne.

Der neue LIEBHERR Vierzylinder Motor mit Vierventilkopf ist immer noch nicht am LAV eingetroffen. Voraussichtlich wird er zu Beginn des nächsten Jahres am Labor eintreffen und der Prüfstand aufgebaut. Es soll eine Bestandesaufnahme gemacht werden, welche das Potential des für die Tier 3 Abgasnorm zertifizierten Motors bezüglich der kommenden Norm Tier 4 darstellen soll.

Nachdem sich die Lieferung des von der Firma LIEBHERR in Aussicht gestellten D934 DI-Dieselmotors mit Vierventiltechnik immer weiter verzögerte, wurde für den zur Verfügung stehenden LIEBHERR D924 DI-Dieselmotor mit Zweiventilkopf ein 3-D Simulationsmodell entwickelt und validiert. Einige Betriebspunkte wurden erfolgreich simuliert. Zusammen mit den Ergebnissen der Russberechnung an einem Projektfremden Motor werden demnächst gute Resultate der Betriebspunkte inklusive Russbildungsverlauf und –verteilung erwartet.

Die Vorbereitungen der Partikelmesstechnik sind abgeschlossen. Es wurden Erfahrungen mit der Analyse von Partikeln aus anderen Motoren gesammelt. Weiter wurde ein Programm für die Datenerfassung erstellt und erfolgreich getestet.

Die Verzögerung der Lieferung und die sich verändernden Randbedingungen für den Industrienahen Teil des Projektes werden im nächsten Jahr teilweise eine Anpassung der Arbeitsinhalte erforderlich machen. Anfangs 2006 erwarten wir diesbzüglich einen Konsensus der Projektpartner und werden das Bundesamt für Energie entsprechend informieren.

## 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 Abgasnorm 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)
- Ventilsteuerzeiten (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.

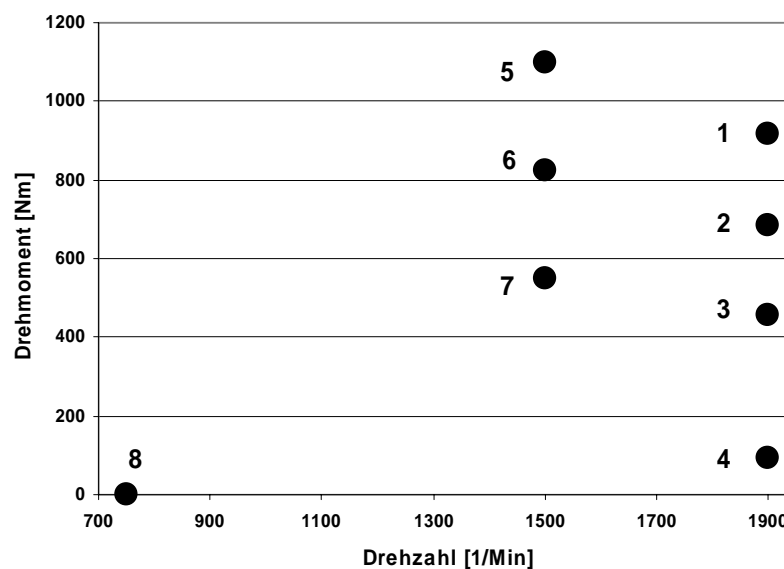


Fig. 1: Betriebspunkte für den LIEBHERR D 934 L Motor. Diese Punkte entsprechen dem C1-Zyklus. Die Betriebspunkte 1-4 entsprechen der Nenndrehzahl bei 10%, 50%, 75% resp. 100% Last, die Punkte 5-7 entsprechen einer definierten Zwischendrehzahl bei 50%, 75% resp. 100% Last. Punkt 8 ist der Leerlauf. Die 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. Das geplante System wird elektromagnetisch angesteuert und hydraulisch bewegt. Weiter ist im System ein Spühlmechanismus integriert, der eine schnelle Abkühlung und Verdünnung des Entnahmegases gewährleisten soll.

Im vergangenen Jahr wurden die Bauteile für das Gasentnahme Ventil (GEV) angefertigt und zusammengebaut. In Fig 2. ist die zusammengebaute Entnahmesonde zu sehen. Die Nadelspitze, wird im Betrieb bis 1cm in den Brennraum hineinragen. Der Hydraulikantrieb wird mit 600 bar gespeisen.

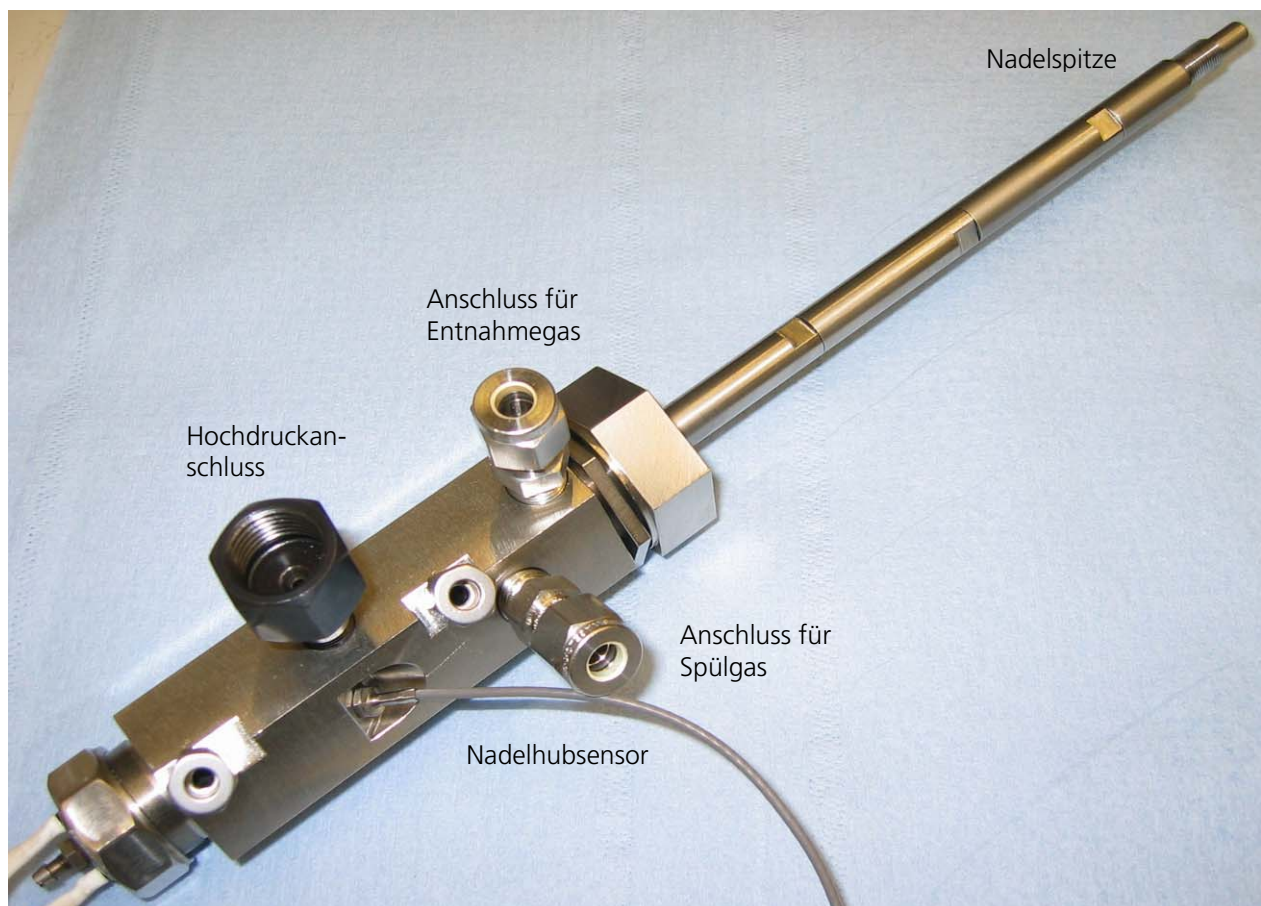


Fig. 2: Zusammengebaute Entnahmesonde

Bei ersten Tests konnte die Funktion des Aktuator (zusammenwirken von Elektromagnet und Hydraulik) überprüft werden. Im nächsten Schritt müssen die Fertigungstoleranzen mit aufwändigem

abtrage respektive so kompensiert werden, damit die Nadel an der Spitze dicht abschliesst, aber die Öffnungsweite nicht beeinträchtigt wird. Wie sich bei diesen Anpassungsarbeiten herausstellte war die Nadel aus Keramik das empfindliche Element das noch Schwierigkeiten bereitet. Für die Funktion in axialer Richtung ist das Bauteil stabil genug. Bei kleinen Querbelastungen, wie sie beim Ein- und Ausbau entstehen können leidet es aber enorm. Aus Mangel an sicheren Alternativen werden die Funktionstests aber weiterhin mit gleichen Nadeln durchgeführt. Parallel dazu ist eine stabilere Alternativlösung in Erarbeitung.

Um die Funktionsweise des GEV überprüfen zu können wurde eigens dafür ein kleiner Prüfstand aufgebaut. Ziel dieses Prüfstandes ist es, ein genau definiertes Gasgemisch in einem genau definierten Zustand bereit zu stellen, um mit der Sonde bei Laborbedingungen Probeentnahmen durchzuführen. Durch ebenfalls bekannten Spülgasfluss können so die entnommene Gasmenge als auch die nachträgliche Verdünnung festgestellt werden. Damit soll in einem weiteren Schritt ein Kennfeld erstellt werden, das es ermöglicht, später im laufenden Betrieb den ideal benötigten Spülgasmassenstrom festzulegen. Dieser Prüfstand für die Voruntersuchung besteht aus einem Zylinder mit einem Innenvolumen, welches demselben, des realen Zylinders im oberen Totpunkt entspricht (Fig. 3). Es wird mit Gasflaschen über eine Druckreduzierstation mit Drücken zwischen 20 bar und 150 bar mit einem N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> Gemisch befüllt. Als Spülgas kommt reiner Stickstoff zum Einsatz. Mit einem CO<sub>2</sub> Sensor kann somit die Verdünnung ermittelt werden. Da im Betrieb an diesem Prüfstand die Auslösung der Sonde durch den Winkelgeber fehlt, wird sie mit einem Puls-generator angesteuert. Dieser kann für einen einzelnen Puls oder für Pulsserien verwendet werden. Am eigentlichen Steuergerät, welches auch im Betrieb am Motor zum Einsatz kommt, kann die Pulsdauer, d.h. die Dauer von Beginn Nadelöffnen bis Beginn Nadelschliessen festgelegt werden. Zudem enthält es einen dauerhaften Zähler um die Anzahl der ausgelösten Impulse festzuhalten. Ein Distanzsensormisst den Nadelhub.



*Fig. 3: Probevolumen zur Funktionsüberprüfung der Entnahmesonde mit Anschlüssen für das GEV, ein Drucksensor, Gasspeisung und Entlüftung.*

Die Vorbereitungen für erste Testmessungen sind im Gang und es wird noch dieses Jahr mit ersten Resultaten gerechnet.

## Aerosolaufbereitung und Partikelmessung

Im Berichtsjahr wurden die notwendigen Teile (Rohre, Ventile, Blenden) für die kontrollierte Verdünnung des Aerosolprobestroms beschafft. Da noch kein Versuchsmotor zur Verfügung stand, konnten nur einige Vorinstallationen durchgeführt werden. Für Erfassung der Messdaten während der Versuche wurde ein Datenerfassungsprogramm erstellt, das die Speicherung der Daten der einzelnen Partikelmessgeräte, der Gasanalysegeräte, sowie der Druck- und Temperatursensoren mit hoher Zeitaufösung in einer Datei erlaubt. Das Programm wurde mit den Geräten erfolgreich getestet. Weitere Erfahrungen bei der Analyse von Partikel mit dem Transmissionselektronenmikroskop wurden mit Proben gesammelt, die an anderen Motoren im Abgasstrang genommen wurden.

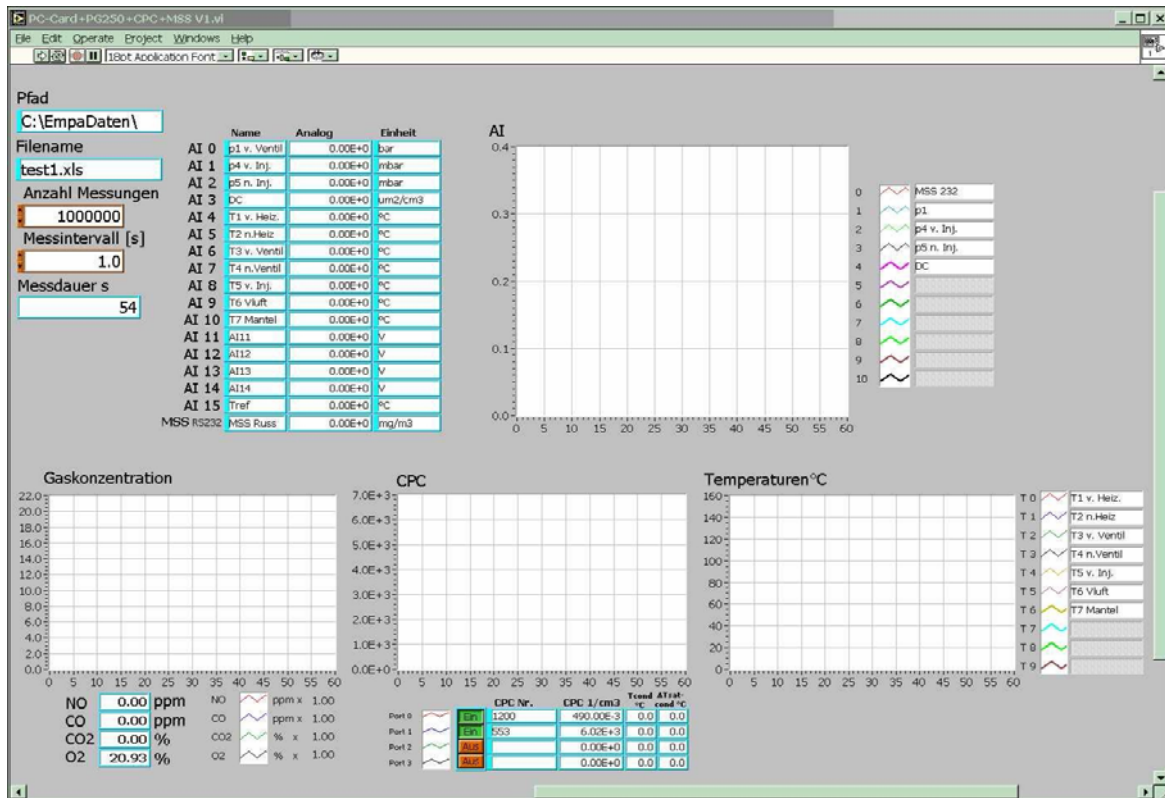


Fig. 3: Benutzeroberfläche des Datenerfassungsprogramms

## Experimentelle Untersuchungen am Prüfstand

Da der Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor (D 934 L) der Firma Liebherr noch immer erst versprochen und noch nicht geliefert wurde, musste der entsprechende Teil des Projektes erneut im Zeitplan zurück verschoben werden. Die Verzögerung entstand aus mehreren Gründen. Die Entwicklung des 6-Zylindermotors der gleichen Baureihe hatte für die Firma LIEBHERR eine höhere Priorität als die 4-Zylinderversion. Die Entwicklung der beiden Versionen verzögerte sich, da es bei der Produktion und Zulieferung von Teilen für die Prototypen sowohl bei der Firma LIEBHERR als auch bei deren Zulieferern zu Engpässen kam.

Da die Prüfstände des Labors dieses Jahr den ETH Richtlinien angepasst werden mussten, konnten auch am Vorgängermodell (D924L) dieses Jahr keine Messungen durchgeführt werden. Die Prüfstände sind mittlerweile wieder bezugsbereit und im Aufbau.

## Simulation der Russbildung

In Anbetracht der Verzögerung im Messbereich wurde der Simulationsteil im Ablauf vorgezogen. Das Ziel besteht darin, gemessene Resultate des GEV oder von optischen Messverfahren in der 3D-Simulation abzubilden.

Als Grundlage für die 3D – Russsimulation dient ein am LAV entwickeltes 0D-Russmodell [1]. Das Modell besteht auf phänomenologischen Betrachtungen und besteht aus einem Russbildungs- und einem Oxidationsterm. Dieses Modell steht in starker Abhängigkeit zur Wärmefreisetzung, Temperatur und Brennstoff-Luft-Verhältnis. Um ein 3 dimensionales Resultat zu erhalten, wird das Modell in jeder einzelnen Zelle ausgewertet. Zur Überprüfung der Ergebnisse werden die erhaltenen Resultate zuerst mit den Resultaten der 0D – Simulation desselben Betriebspunktes verglichen.

Für das Russmodell ist eine gute Abbildung der Wärmefreisetzung sehr wichtig. Da für den geplanten Liebherrmotor keine Messwerte und für dessen noch keine zufriedenstellende Simulationsresultate bezüglich Druck und Wärmefreisetzung vorhanden sind wurde das Russmodell an einem Motor ausserhalb dieses Projektes durchgeführt. Für diesen Motor wurden schon umfangreiche Simulationen mit recht guten Resultaten durchgeführt.

Die Parameter für das Russmodell wurden in der 3D – Simulation direkt von der 0D – Simulation übernommen. Dort wurden sie über 30 Betriebspunkte mittels bioinspirierten Algorithmen optimiert. Für die 3D – Simulation wurden einige typische Betriebspunkte bei 75% Last ausgewählt mit drei verschiedenen Einspritzprofilen und jeweils einigen verschiedenen Einspritzwinkeln. Wie in Fig. 4 zu sehen ist werden die Trends die von den 0D – Ergebnissen zu erwarten sind recht gut wiedergegeben. Allerdings auf einem höheren Niveau. Diese Resultate werden im kommenden Projektabschnitt genauer untersucht. Dabei wird vor allem ein Augenmerk auf das unterschiedliche Grundniveau der Resultate geworfen. Ebenfalls soll das Russmodell bei Simulationen, der in den zukünftigen Messungen verwendeten Liebherr Motoren angewendet werden. Zusätzlich soll ein neues Verbrennungsmodell zu genaueren Wärmefreisetzungsraten und Temperaturrechnungen führen, was die Resultate der Russsimulation positiv beeinflussen soll.

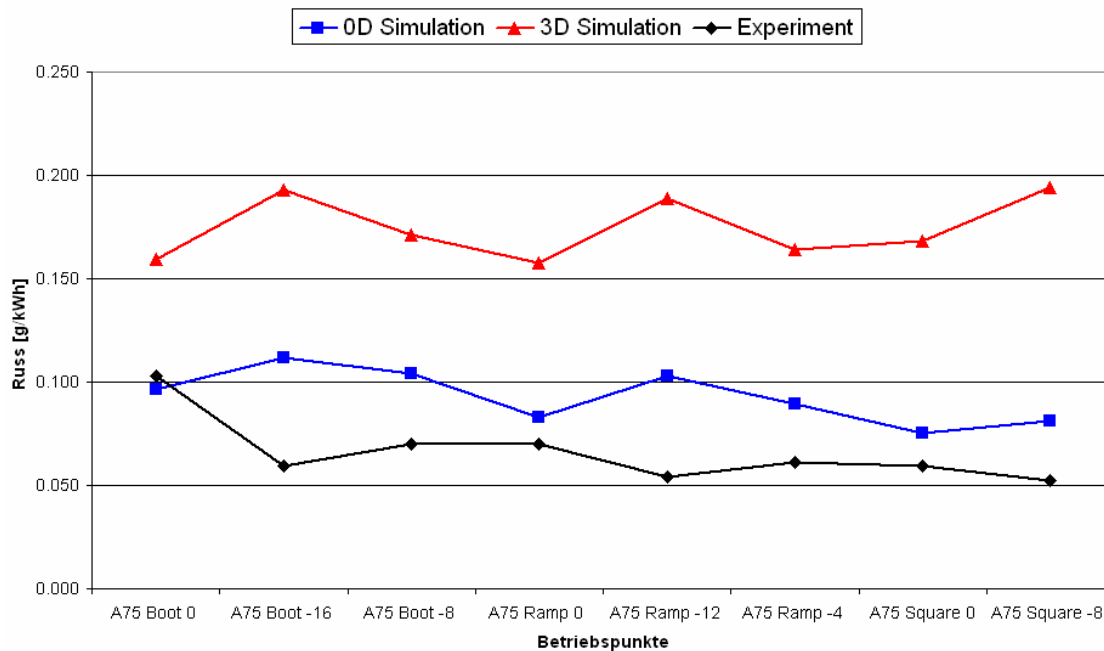


Fig. 4: Vergleich der Russemissionen von verschiedenen Betriebspunkten.

## Nationale Zusammenarbeit

Zum jetzigen Zeitpunkt beschränkt sich die Zusammenarbeit mit dem Industriepartner LIEBHERR Machines Bulle S.A. auf den Datenaustausch und die Vorbereitung der Motorexperimente, 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) ebenfalls in dieses Projekt involviert (Kap. Partikelmesstechnik).

## Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Das Gasentnahme Ventil wurde dieses Jahr fertig gestellt. Aufgrund der sehr fragilen Verbindung zwischen der Nadel und dem Aktuator konnten noch keine Entnahmetests durchgeführt werden. Die Mechanik konnte allerdings getestet werden und funktioniert soweit wie geplant.

Durch weitere Verzögerung in der Bereitstellung des Prüfmotors und den nötigen Sanierungsarbeiten der Prüfstände, musste der Projektablauf mehrmals umgestellt werden. So wurden mittlerweile einige Betriebspunkte des Vorgängermodells (D924) erfolgreich simuliert. Auf diesen Simulationen wird nun vorgängig die Simulation der Russbildung getestet, angepasst und optimiert. Die Resultate der Russsimulationen an einem Projektfremden Motor geben ermutigen, dasselbe Modell auch an diesem Motor anwenden zu können. Dies soll noch dieses Jahr durchgeführt werden.

Weiter wird noch immer auf die Ankunft des neuen Motors gewartet, an dem dann die eigentlichen Messkampagnen durchgeführt werden sollen. Gemäss dem neuesten Stand der Information soll der Motor anfangs des nächsten Jahres bei uns eintreffen.



## Partikelmesstechnik

Von der EMPA sind in diesem Jahr hauptsächlich Planung und Vorbereitung des Aufbaus von Probenahme und Aufbereitung für die Partikelcharakterisierung durchgeführt worden. Dazu wurden auch Abschätzungen zu den zu erwartenden Konzentrationen gemacht und Erfahrungen mit einem elektrostatischen Probensammler für die mikroskopischen Analysen gesammelt. Um ein möglichst unverändertes Bild der Partikel zu erhalten, wird eine primäre Rohgasverdünnung von 1:100 angestrebt. Die sich durch die stark schwankenden Druckverhältnisse einstellende Verdünnungsrate soll durch die Eindüsung eines Tracergases in die Verdünnungsluft ermittelt werden. Zur Charakterisierung der Partikel wird die Anzahlgrößenverteilung (NSD), die Morphologie und - wenn möglich - die Masse herangezogen. Die Messung der NSD erfolgt mit einem SMPS, die Bestimmung der Masse mit der Filtermethode und mit einem photoakustischen Sensor. Erkenntnisse zur Morphologie sollen mit Hilfe von Analysen mit einem Transelektronenmikroskop (TEM) gewonnen werden und Aussagen zur qualitativen Zusammensetzung der Partikel möglich werden.

## Referenzen

- [1] M. Warth, P. Obrecht, T. Koch, K. Boulouchos: ***Prediction of Heat Release Rates, NO- and Soot Emissions in Diesel-Engines - Optimization and Validation of a New Approach.*** 9th Symposium "The Working Process of the I. C. Engine", Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, 2003.