



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

# **DARSTELLUNG DES TECHNOLOGIEPOTENTIALS VON ZUKÜNFTIGEN DIESELMOTOREN**

## **ERFÜLLUNG ZUKÜNFTIGER EMISSIONSVORSCHRIFTEN BEI NIEDRIGEM CO2 AUSTOSS TITEL DES PROJEKTS**

### **Schlussbericht**

Ausgearbeitet durch

**Dipl.-Ing. P. Wilhelm, ETH Zürich, Institut für Energietechnik (IET), Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)**  
Sonneggstrasse 3, 8092 Zürich, [wilhelm@lav.mavt.ethz.ch](mailto:wilhelm@lav.mavt.ethz.ch), [www.lav.ethz.ch](http://www.lav.ethz.ch)

**Prof. Dr. K. Boulouchos, ETH Zürich, Institut für Energietechnik (IET), Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)**  
Sonneggstrasse 3, 8092 Zürich, [boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), [www.lav.ethz.ch](http://www.lav.ethz.ch)

**Dr. M. Mohr, EMPA, Verbrennungsmotoren**  
Ueberlandstr. 129, 8600 Dübendorf, [martin.mohr@empa.ch](mailto:martin.mohr@empa.ch), [www.empa.ch](http://www.empa.ch)

**D. Schreiber, EMPA, Verbrennungsmotoren**  
Ueberlandstr. 129, 8600 Dübendorf, [daniel.schreiber@empa.ch](mailto:daniel.schreiber@empa.ch), [www.empa.ch](http://www.empa.ch)

## **Impressum**

Datum: 13. März 2006

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Projektleiter: Dr. A. Hintermann

Projektnummer: 47366

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	1
Abstract .....	1
1. Ausgangslage .....	2
2. Ziel der Arbeit .....	2
3. Ergebnisse .....	3
Entwicklung des Gasentnahmesystems .....	3
Partikelmesstechnik .....	10
Experimentelle Untersuchungen am Prüfstand .....	12
Simulationsergebnisse .....	12
4. Schlussfolgerungen .....	14
Symbolverzeichnis .....	15
Referenzen .....	15

## Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes sollten Möglichkeiten untersucht werden, um Schadstoffemissionen zukünftiger „Heavy-Duty“ Dieselmotoren weiterhin zu reduzieren, dies, bei weiterhin niedrigem Brennstoffverbrauch, damit der spezifische CO<sub>2</sub>-Ausstoss nicht weiter wächst. Im Laufe des Vorhabens wurde der Fokus stark auf die messtechnische Erfassung der Russ- und NO<sub>x</sub>-Emission im Brennraum während der Verbrennung gelegt, wozu die Entwicklung eines schnellen Entnahmevertils und die (ETH-Teil) Vorbereitung der nachgeschalteten Messtechnik zur Russpartikelcharakterisierung (EMPA-Teil) gehörte. Zusätzlich sollte ein Russsimulationsmodell der ETH auf seine Tauglichkeit hin untersucht werden. Schliesslich sollte an einem Motor des Industriepartners Liebherr das Potential der Common-Rail Einspritzung mit 4-Ventil-Technologie evaluiert werden.

Einige der Ziele dieses ehrgeizigen Projekts wurden weitgehend erfüllt, ein Teil davon konnte jedoch nicht im vorgesehenen Umfang realisiert werden. Der EMPA-Teil wurde durch die Fertigstellung der entsprechenden Dissertation erfolgreich bearbeitet und das schnelle Entnahmevert ist realisiert worden; dies funktioniert noch nicht fehlerfrei, die Behebung letzter Probleme steht jedoch unmittelbar bevor. Das Simulationsprogram für die Russemissionen im 3-D CFD Code zeigt eine gute Übereinstimmung mit den vorhandenen Messungen. Leider konnte der vorgesehene Motor der Firma Liebherr nicht rechtzeitig geliefert werden, weswegen – zusammen mit der Verzögerung der Fertigstellung des Fast Sampling Valve (FSV) der Projektteil zur Demonstration des Potentials des konkreten Industrieproduktes nicht realisiert werden konnte. Das LAV plant, ab 2007 im Rahmen einer Industriekooperation, sowohl den Nachweis der Funktionalität des FSV zu erbringen, als auch die Optimierung des motorischen Brennverfahrens durchzuführen.

## Abstract

The task to get the time resolved local distribution of soot during the combustion cycle of a internal combustion engine to develop new combustion concepts for engines with nearly zero soot emissions is the main task of this project. A 0-D model to simulate the sootformation was adapted to its aequivalent 3-D model and tested at the example of a research engine. Because the 3-D model was deviated form a phenomenological 0-D model and its parameters were assumed to be the same, the results at the end of combustion of the two simulation tools were compared. This comparison showed, that this phenomenological approach gives good results even in 3-D. To validate the 3-D model concerning the local distribution of soot in time, a fast sampling valve with the ability to extract samples of the cylinder content during the combustion cycle was developed. This fast sampling valve couldn't be tested yet because of two reasons: the planned test engine is still not available and there are still some deficiencies to eliminate to guarantee good results.

## 1. Ausgangslage

In Anbetracht der immer strengeren Anforderungen bezüglich der Emissionen von Verbrennungsmotoren, müssen stetig bessere Brennverfahren zum Erreichen dieser Ziele entwickelt werden. Um die Fortschritte im Entwicklungsbereich zu überprüfen und zu bewerten werden immer genauere und detaillierte Messergebnisse benötigt, die mit herkömmlichen Installationen nicht oder nur teilweise erzielt werden können. Insbesondere für die Detektion von Russ während dem Brennverlauf fehlen Messgeräte die sowohl räumlich wie zeitlich aufgelöste genaue Resultate über den gesamten Zyklus wiedergeben können.

## 2. Ziel der Arbeit

Dieses Projekt soll eine Bestandesaufnahme eines Medium Duty Diesel Motors mit Vierventilkopf, Pumpe-Leitungs-Düse Einspritzsystem und interner 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:

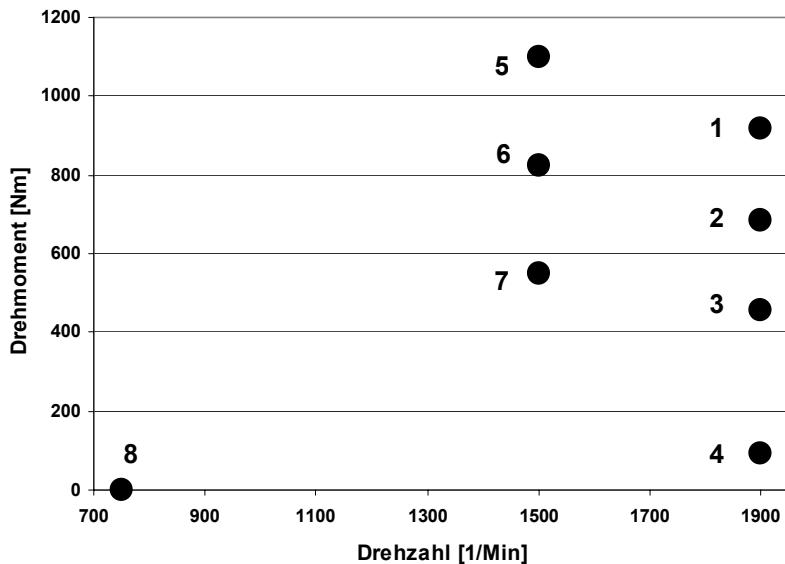
- AGR – Technik (intern bzw. extern)
- Aufladung
- Injektoren (Geometrie)
- Ventilsteuerzeiten (Nockenwellenprofil)
- Brennraum (Form der Kolbenmulde)
- Einspritzverlauf

in Betracht gezogen. Die Bestandesaufnahme und Verbrennungsoptimierung für TIER 4 (siehe Tabelle 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 Figur 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

**Tabelle 1:** Vergleich der Emissionsnormen für Off - Road Dieselmotoren, jetzt und in Zukunft.

**Figur 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.

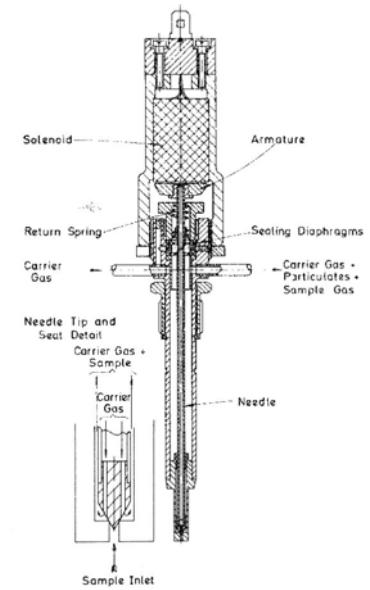
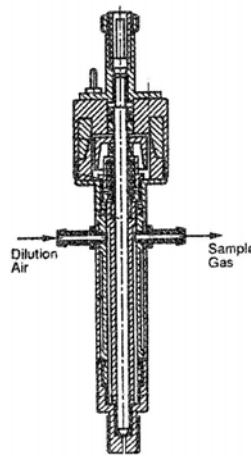
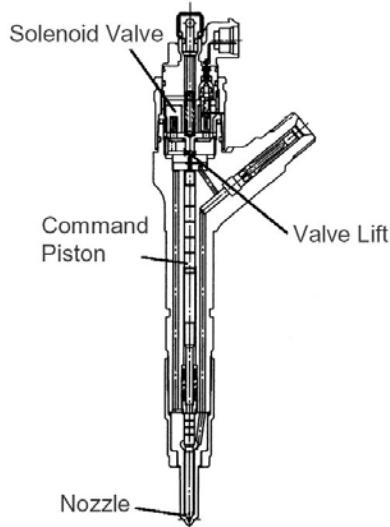
### 3. Ergebnisse

#### 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 entschieden ein solches System unter dem Namen *Fast Sampling Valve* (FSV) 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 [1]-[6]. 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 Abbildungen Figur 2 bis Figur 4 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 wurde mit der Berechnung der hydraulisch relevanten Grössen und anschliessend mit der definitiven Konstruktion begonnen.



**Figur 2:** Standard Common Rail Injektor.

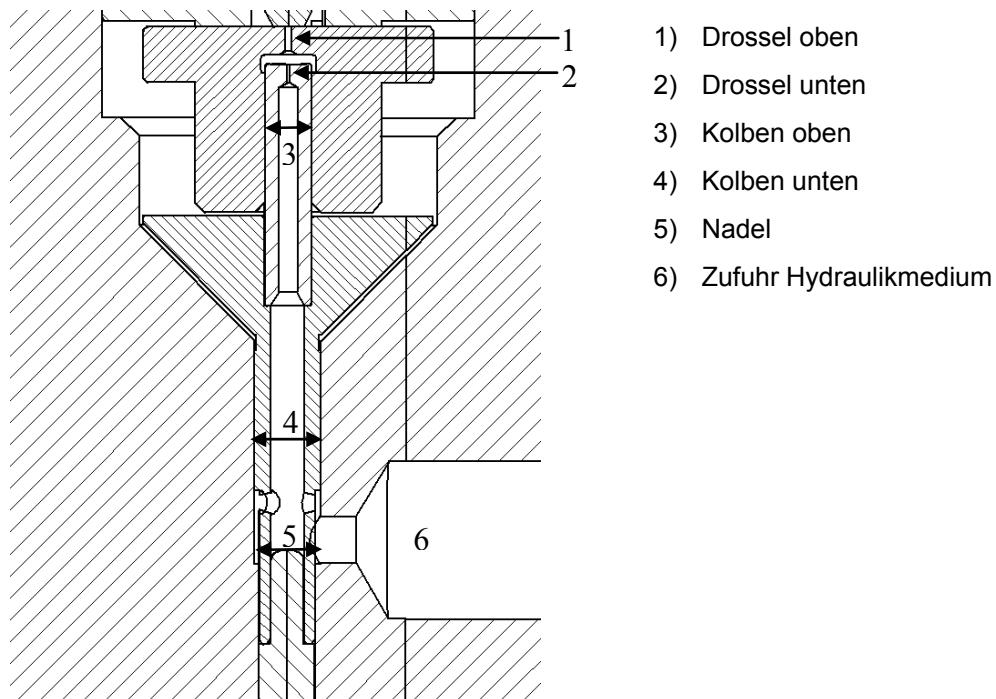
**Figur 3:** Elektromagnetische Entnahmesonde wie sie in [3] verwendet wurde.

**Figur 4:** Elektromagnetische Entnahmesonde wie sie in [2] verwendet wurde.

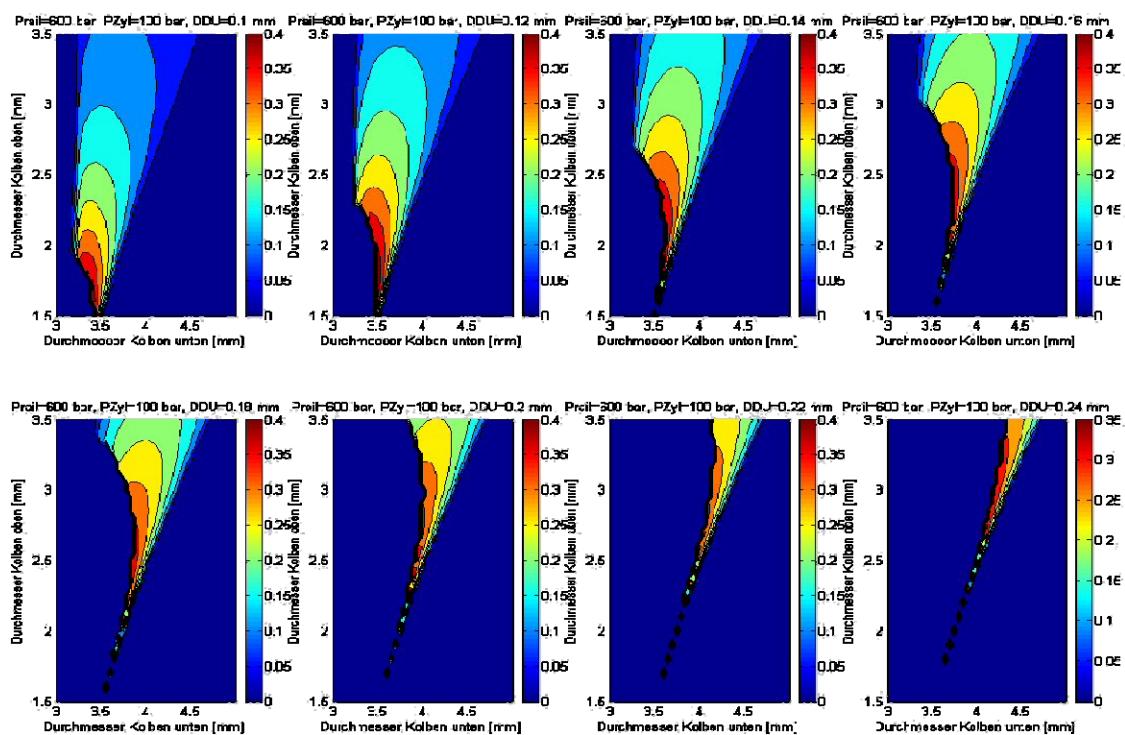
Bei der Berechnung der hydraulisch relevanten Größen wurden für verschiedene Variationen der Kolben- und Drosseldurchmesser (vgl. Figur 5) mögliche Nadelhubverläufe resp. der maximale Nadelhub, sowie die auf die Bauteile wirkenden Kräfte berechnet. Die Kriterien welche beurteilt wurden waren folgende:

1. Öffnungsduer (Beginn der Öffnungsbewegung bis Ende Schliessbewegung) war auf 0.5 ms beschränkt.
2. Die Schliessgeschwindigkeit war auf 1 m/s beschränkt, um zu grosse Impulsänderungen beim Aufprall der Nadel auf den Nadelsitz zu vermeiden.
3. Der Nadelhub sollte möglichst gross sein.
4. Der Einsatz soll optimiert werden über verschiedene Druckverhältnisse im Zylinder und am Rail.

Auf Grund von schon vorhandenen Elementen wie Elektromagnet und Rückstellfeder für die Elektromagnetische Ansteuerung der Hydraulik wurde der „Durchmesser der Drossel oben“ auf max. DDO = 0.3 mm festgelegt. Diese Drossel ist direkt verantwortlich für die maximale Öffnungsgeschwindigkeit und sollte für schnelles weites öffnen der Nadel möglichst gross sein. Für die weitere Optimierung wurde sie weiter nicht mehr berücksichtigt. Ebenfalls fixiert ist der Durchmesser der Nadel, da auch in diesem Fall zusätzliche Grösse Vorteile bzgl. Stabilität bringt, jedoch durch die eingeschränkten Einbaumasse ein Maximum hat. Für die Öffnungsgeschwindigkeit sind die nächsten Faktoren, „Durchmesser der Drossel unten“ sowie „Durchmesser des Kolben oben“ verantwortlich. Ein kleiner Kolbendurchmesser oben bewirkt sowohl eine schnellere Öffnungs- als auch eine schnellere Schliessgeschwindigkeit verglichen mit einem grösseren Kolbendurchmesser da durch das kleinere Volumen weniger Hydraulikflüssigkeit bewegt werden muss. Eine grössere untere Drossel wirkt sich beschleunigend auf die Schliessgeschwindigkeit aus und verlangsamt auf die Öffnungsgeschwindigkeit. Dabei sollen sich die Masse natürlich auch konstruktiv realisieren lassen. Ein Beispiel für eine Berechnungsreihe ist in Figur 6 aufgezeigt. Dabei ist auf der Abszisse jeweils der untere Kolbendurchmesser und auf der Ordinate der obere Kolbendurchmesser aufgetragen. Die obere Drossel wurde wie schon erwähnt auf 0.3 mm festgelegt. Die untere Drossel variiert von Bild zu Bild um den Angegebenen Wert (DDU). Die dargestellte Serie bezieht sich auf einen Raildruck von 600 bar und einem Zylinderdruck von 100 bar. Die Farbe gibt einen Anhaltspunkt über den möglichen Nadelhub in [mm].



Figur 5: Schema des Hydraulikantriebs mit der Bezeichnung der hydraulisch wirkenden Flächen und Drosseln.



Figur 6: Berechnungsserie zur Ermittlung geeigneter hydraulischer Flächen und Drosseln für einen Railldruck von 600 bar, Zylinderdruck 100 bar und der oberen Drossel von 0.3 mm. Variation der unteren Drossel von 0.1 mm bis 0.24 mm.

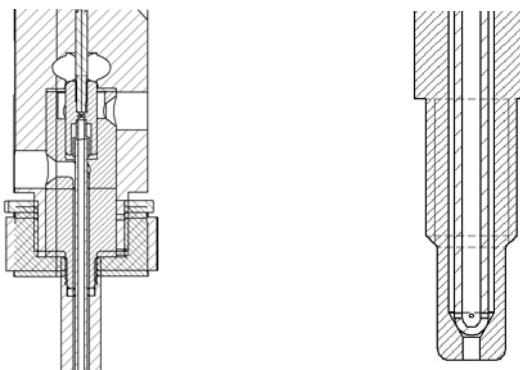
Die für das FSV verwendeten Größen sind in der folgenden Tabelle 2 dargestellt:

Durchmesser Drossel oben	0.3 mm
Durchmesser Drossel unten	0.16 mm
Durchmesser Kolben oben	2.5 mm
Durchmesser Kolben unten	3.55 mm
Durchmesser Nadel	3.0 mm

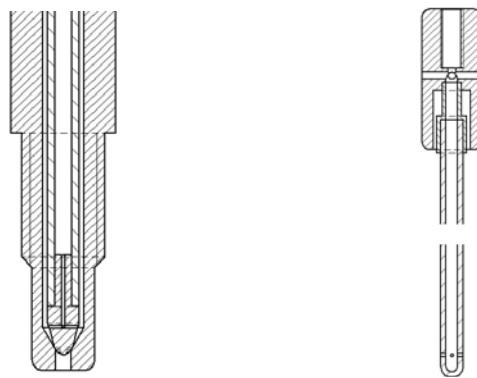
**Tabelle 2:** Abmessungen der hydraulisch wirkenden Größen.

Ein weiterer Punkt der die Konstruktion stark beeinflusste war die Geometrie des Zylinderkopfes des LIEBHERR D934. Aufgrund der 4-Ventiltechnik bleibt sehr wenig Platz um Messgeräte durch den Zylinderkopf in den Brennraum zu bringen. Die gefundene Variante lässt eine Bohrung von 6 mm Durchmesser zu. Dieser kleine Durchmesser stellt höchste Anforderungen an das verwendete Material, da dies sehr warmfest bei sehr dünner Wandstärke sein muss. Die Suche nach geeignetem Material hat sehr viel Zeit in Anspruch genommen. Doch dies war in Anbetracht der in der Anwendung auftretenden Bedingungen für das Bauteil auch nötig.

Die nächste Anforderung war, das Messgas möglichst während der Entnahme zu verdünnen, wenigstens jedoch die Möglichkeit zu haben, das FSV zu spülen. Dazu musste ein geeigneter Spülmechanismus entwickelt werden. Die gewählte Variante führt Spülgas durch die hohle Nadel zur Spitze des FSV. Die Spülung wird durch drei Komponenten realisiert. Die Aufgabe der ersten Komponente (Figur 7) ist es, frisches Spülgas in das Nadelrohr zu bringen und Messgas wegzuführen. Zugleich ist dieses Bauteil verantwortlich, dass die Bewegung aus dem hydraulischen Aktuator möglichst nicht behindert wird, Leckageflüssigkeit des Hydraulischen Mediums aber unter keinen Umständen in den Messstrom gelangen kann. Die zweite Komponente ist die hohle Nadel. Durch feinste Bohrungen an der Nadelspitze ist es damit möglich die entnommenen Gase aus der Sonde herauszuspülen (Figur 8). Diese Vorgabe stellte ebenfalls höchste Ansprüche an das Nadelmaterial. Die gefundene Lösung – ein, an der Spitze rund geschlossenes Keramikrörhrchen – wurde bei den ersten Bewegungstests aufgrund der hohen Bruchanfälligkeit jedoch als ungeeignet befunden und musste durch eine metallische Lösung ersetzt werden. Die neue Version der Nadel ist in Figur 9 zu sehen. Es wurde einzig das Keramikrörhrchen durch ein metallisches Röhrchen aus einer ebenfalls sehr Temperaturfesten Zirkoniumlegierung ersetzt. Zusätzlich musste eine Nadelspitze angebracht werden was ebenfalls in Figur 9 zu sehen ist. Die dritte Komponente stellt den Übergang zwischen dem Nadelrörhrchen und der Verbindung zum hydraulischen Aktuator her. Ebenfalls muss das Spülgas ins Röhrchen geleitet werden. Dieses Übergangsstück ist in Figur 10 zu sehen (In eingebauten Zustand Figur 7).



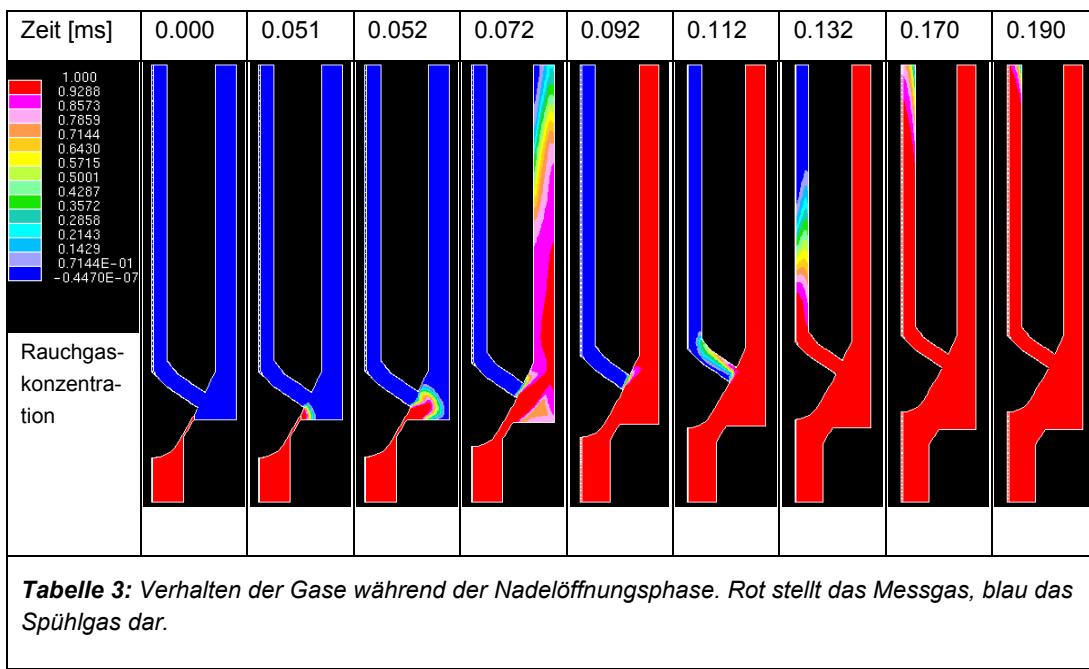
**Figur 7:** Spülmechanismus im Gehäuse. **Figur 8:** Spülmechanismus an der Spitze.

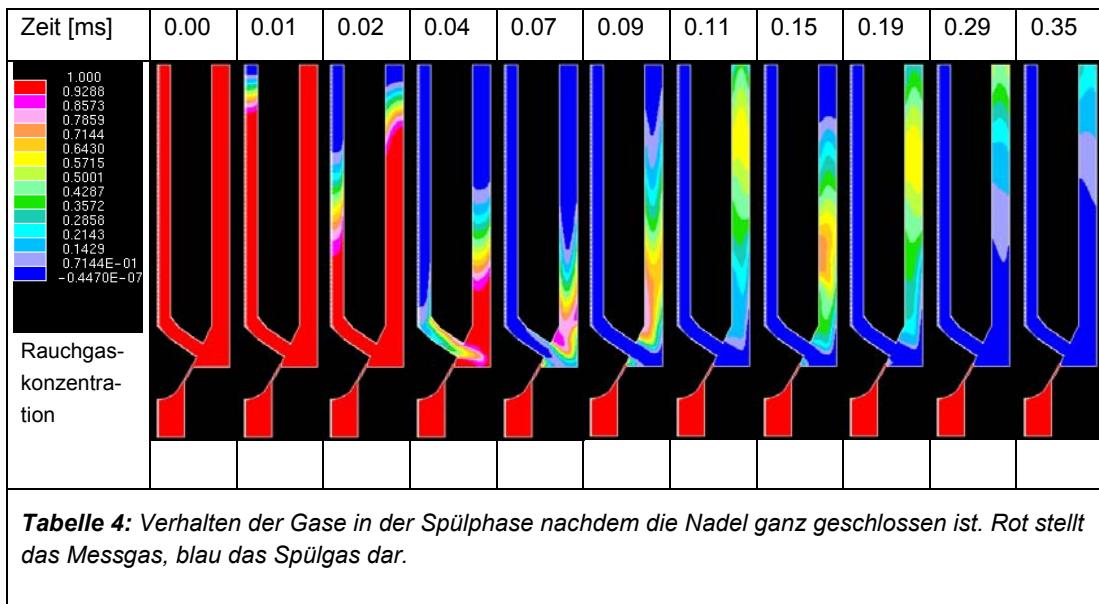


**Figur 9:** Zweite Version der Nadel mit gebauter Nadelspitze.

**Figur 10:** Detail Nadelspitze und Übergangsstück.

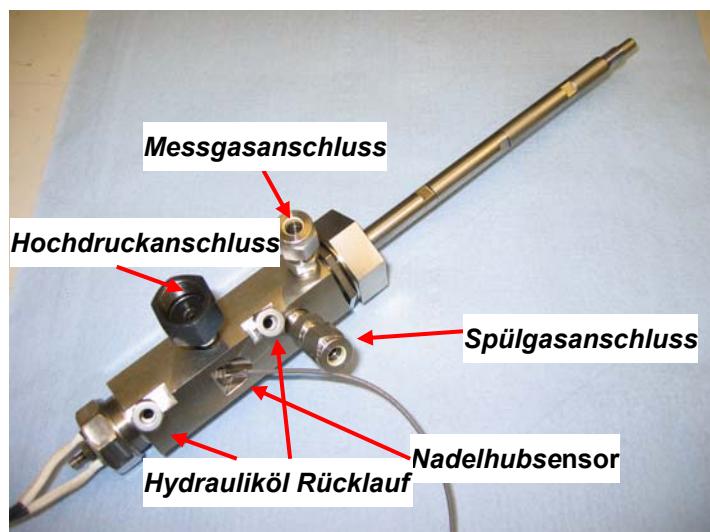
Zur Unterstützung der Konstruktion wurde der Spülmechanismus mit dem 3-D Simulationspacket *StarCD* simuliert. In der Simulation ist erkennbar, dass es voraussichtlich nicht möglich ist, während der Entnahme das Messgas zu verdünnen, da das Messgas mit einer enormen Geschwindigkeit in das FSV strömt und das Verdünnungs- und Spülgas blockiert oder sogar zurück drängt. Die Sequenz des Nadelöffnens ist in Tabelle 3 dargestellt. Die schwarzen Bereiche stellen die Wände dar. Aus Symmetriegründen ist nur die rechte Hälfte des FSV – Sondenspitze dargestellt. Dabei ist rot das Messgas und blau das Spülgas. Wie zu erkennen ist, wird das Spülgas zum Teil gegen Ende des Nadelhubs in die Nadel zurückgedrängt. Tabelle 4 ist die Spülphase dargestellt. Durch schwer zu definierende Randbedingungen, d.h. welches Medium befindet sich am jeweiligen Ausgang, sieht es bei der Spülphase aus, als ob Spülgas vom Auslass her ebenfalls wieder zurückfliest. Dies ist in Wirklichkeit jedoch Rauchgas. Es ist nicht möglich, während der gleichen Simulation verschiedene Randbedingungen zu setzen. Daher wird automatisch zurückströmendes Gas als Spülgas markiert, obwohl die Leitung natürlich noch voll Messgas wäre. Es ist trotzdem erkennbar, dass nach kurzer Zeit das Spülgas die Messgase im berechneten Bereich verdrängt haben. Es ist jedoch auch erkennbar, dass keine befriedigende Mischung stattfindet. Daher ist es vonnöten, vor den Analysegeräten genügend Verdünnung und Durchmischung sicherzustellen. Dieser Teil wird zusammen mit der Partikelmesstechnik von der EMPA hergestellt.



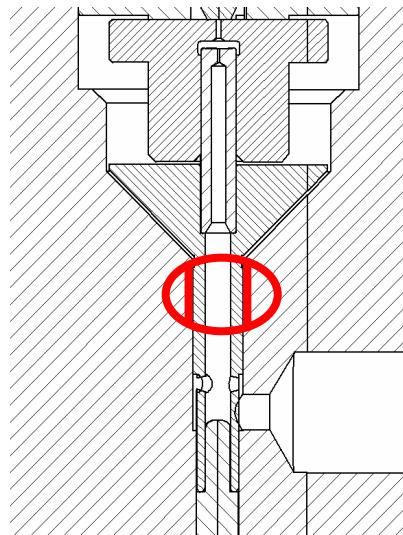


Aufgrund der Beobachtungen aus der 3-D Simulation, sowie den Berechnungen für die hydraulischen Größen wurde anschliessend das FSV konstruiert und hergestellt. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist die zusammengebaute Entnahmesonde zu sehen. Die Nadelspitze, wird im Betrieb bis 1cm in den Brennraum hineinragen. Der Hydraulikantrieb wird mit 600 bar gespiesen, die Speisung kann jedoch bis auf 2000 bar erhöht werden. Bei ersten Tests konnte die Funktion des Aktuator (zusammenwirken von Elektromagnet und Hydraulik) erfolgreich überprüft werden. Im nächsten Schritt müssen die Fertigungstoleranzen mit aufwändigen Anpassungen so kompensiert werden, damit die Nadel an der Spitze dicht abschliesst, ohne die Öffnungsweite zu beeinträchtigen. Wie sich bei diesen Anpassungsarbeiten herausstellte war die Nadel aus Keramik das empfindliche Element das Schwierigkeiten bereitete und durch die gebaute Version wie in Figur 9 ersetzt werden musste. Die neue Version der Nadel ist weniger anfällig auf Querbelastungen, bereitet keine Probleme weder beim Ein- noch beim Ausbau und ist für die Funktion in axialer Richtung stabil genug.

Aufgrund verschiedener Details die nach der Fertigung aufgrund von Beobachtungen korrigiert oder abgeändert werden mussten, gab es einige Verletzungen von sensitiven Oberflächen im Hydraulikbereich des Gehäuses. Speziell zu erwähnen ist hier der Bereich, der in Figur 12 markiert ist. Durch diesen Defekt kann der Druck im Hydraulikvolumen zwischen der untern und obern Drossel (siehe Figur 5) nicht mehr aufgebaut werden, da die Hydraulikflüssigkeit durch an der defekten Oberfläche leckt. Es wurden verschiedene Versuche durchgeführt, den Defekt zu beheben, ohne das Gehäuse neu zu fertigen. Bis zum jetzigen Zeitpunkt ohne Erfolg. Momentan wird abgeklärt, ob das Gehäuse, resp. die besagte Bohrung mit den nötigen Toleranzen ausgebessert werden kann oder ob das Gehäuse tatsächlich neu gefertigt werden muss.



**Figur 11:** Zusammengebaute Entnahmesonde mit Bezeichnung der erkennbaren Anschlüsse.



**Figur 12:** Schema des Hydraulikantriebs mit der Markierung der verletzten Oberfläche am Gehäuse.

Um die Funktionsweise des FSV 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 dem FSV 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 (Figur 13). 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 Pulsgenerator 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 der Schliessbewegung festgelegt werden. Zudem enthält es einen dauerhaften Zähler um die Anzahl der ausgelösten Impulse festzuhalten. Ein Distanzsensor am FSV misst den Nadelhub.

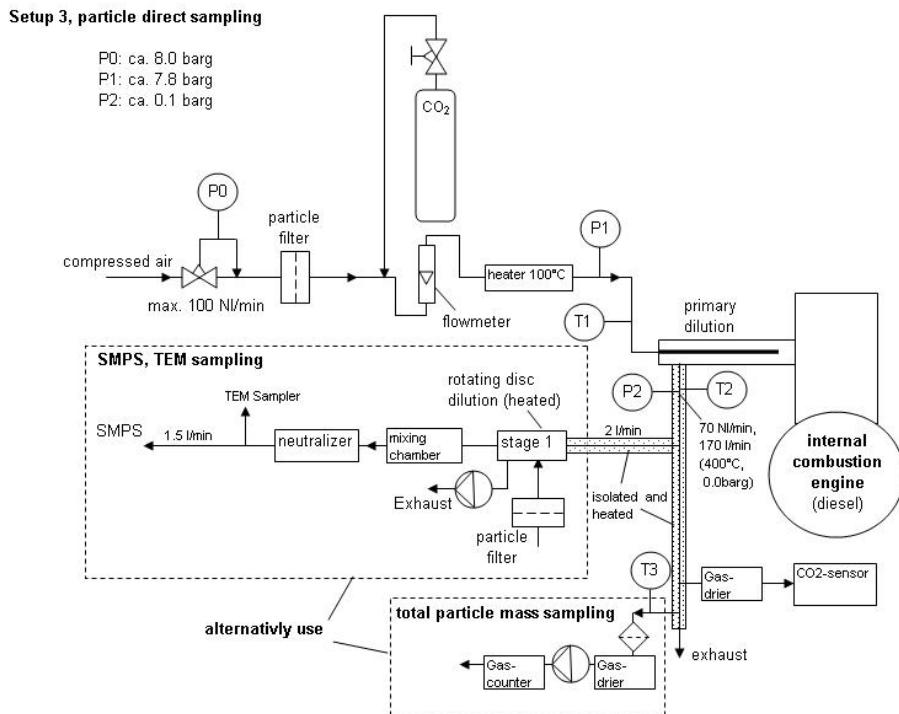


**Figur 13:** Probevolumen zur Funktionsüberprüfung der Entnahmesonde mit Anschlüssen für das FSV, ein Drucksensor, Gasspeisung und Entlüftung.

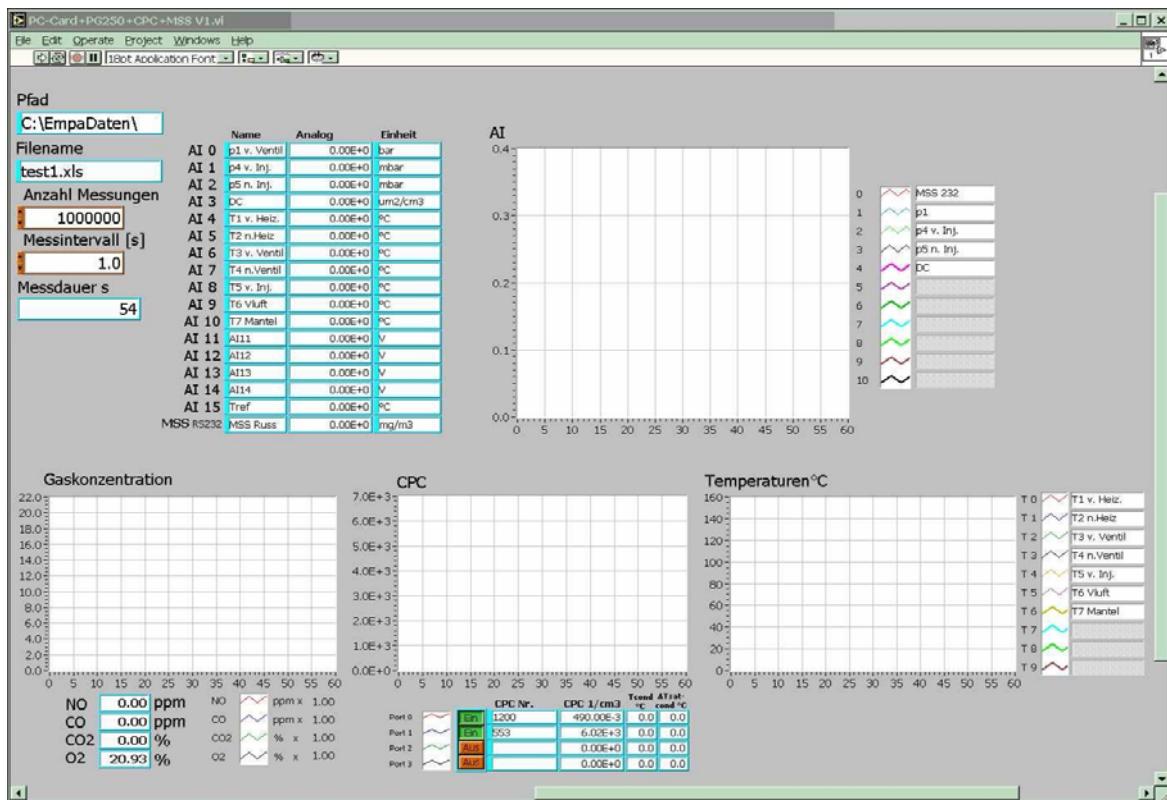
## PARTIKELMESSTECHNIK

Von der EMPA sind 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 *Transmissionselektronenmikroskop (TEM)* gewonnen werden und Aussagen zur qualitativen Zusammensetzung der Partikel möglich werden. Da der Motor nicht zur Verfügung stand, wurden anderen Motoren Erfahrungen mit dem Sammeln von Partikeln auf einem Cu-Netzchen für TEM-Untersuchungen gesammelt und der Messaufbau optimiert. Inwieweit diese Erkenntnisse auf den konkreten Messaufbau am Liebherr-Motor übertragen werden können, bleibt jedoch offen, da die Druckverhältnisse stark verschieden sind.

In Figur 14 ist das Messsetup für die Analyse des Messgases aus dem FSV dargestellt. Gemäss diesem Schema wurden anschliessend die notwendigen Teile (Rohre, Ventile, Blenden) für die kontrollierte Verdünnung des Aerosolprobestroms beschafft. Da 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 Gasanalysegeräten, sowie der Druck- und Temperatursensoren mit hoher Zeitauflösung in einer Datei erlaubt. Das Programm wurde mit den Geräten erfolgreich getestet. Das Userinterface ist in Figur 15 dargestellt. Weitere Erfahrungen bei der Analyse von Partikel mit dem Transmissionselektronenmikroskop wurden mit Proben gesammelt, die an anderen Motoren im Abgasstrang genommen wurden.



**Figur 14:** Partikelmesssetup zur Analyse des Messgases aus dem FSV.



Figur 15: Benutzeroberfläche des Datenerfassungsprogramms

## EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AM PRÜFSTAND

Nachdem die Lieferung des Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor (D 934 L) der Firma Liebherr erneut einige male verschoben wurde und bis sehr spät im Projekt nicht geliefert wurde, konnte der entsprechende Teil des Projektes nicht realisiert werden.

Die Verzögerung entstand gemäss Aussagen der Firma LIEBHERR 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. Mittlerweile soll der Motor fertiggestellt und verfügbar sein.

Da die Prüfstände des Labors dieses Jahr den ETH Richtlinien angepasst werden mussten, konnten auch am Vorgängermodell (D924L) keine Messungen durchgeführt werden. Die Prüfstände sind mittlerweile wieder bezugsbereit und im Aufbau, die Bereitstellung wird für Anfangs März 2007 erwartet.

## SIMULATIONSERGEBNISSE

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

Als Grundlage für die 3-D Russsimulation dient ein am LAV entwickeltes 0D-Russmodell [7]. 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-D Resultat zu erhalten, wird das Modell in jeder einzelnen Zelle ausgewertet. Zur Überprüfung der Ergebnisse werden die erhaltenen Resultate zuerst mit den Resultaten der 0-D Simulation desselben Betriebspunktes verglichen.

Das phänomenologische Modell des 0-D Simulationstools unseres Labors [7] wurde in die Simulationssoftware *StarCD* implementiert. Das Modell besteht aus einem Bildungs- (Gleichung (1)) und einem Oxidationsterm (Gleichung (3)) die zusammen die Änderungsrate der Russmasse (Gleichung (1)) beschreiben. Ebenfalls mitberücksichtigt wird die Tatsache, dass Russ nur in einem bestimmten Temperatur-Lambdafeld gebildet wird [8].

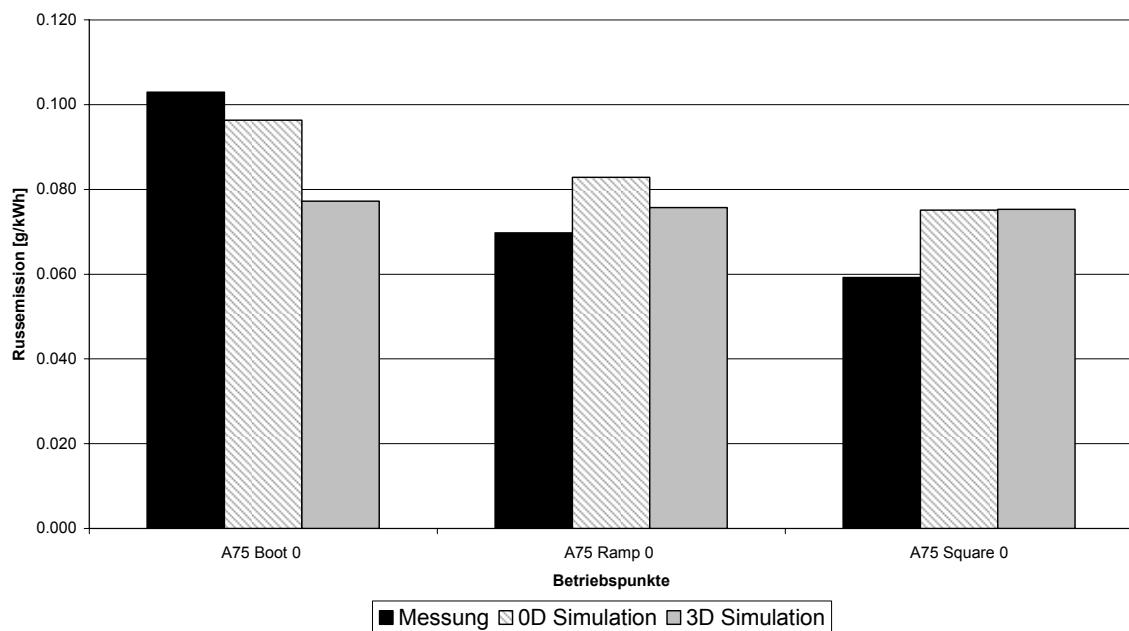
$$\frac{dm_{Soot}}{d\varphi} = \frac{dm_{Soot,form}}{d\varphi} - \frac{dm_{Soot,ox}}{d\varphi} \quad (1)$$

$$\frac{dm_{Soot,form}}{d\varphi} = A_{form} \cdot \frac{dm_{Soot}}{d\varphi} \Big|_{diffusion} \cdot \left( \frac{p_{cyl}}{p_{ref}} \right)^{n1} \cdot f(T_{A,form}, \lambda_{form}) \quad (2)$$

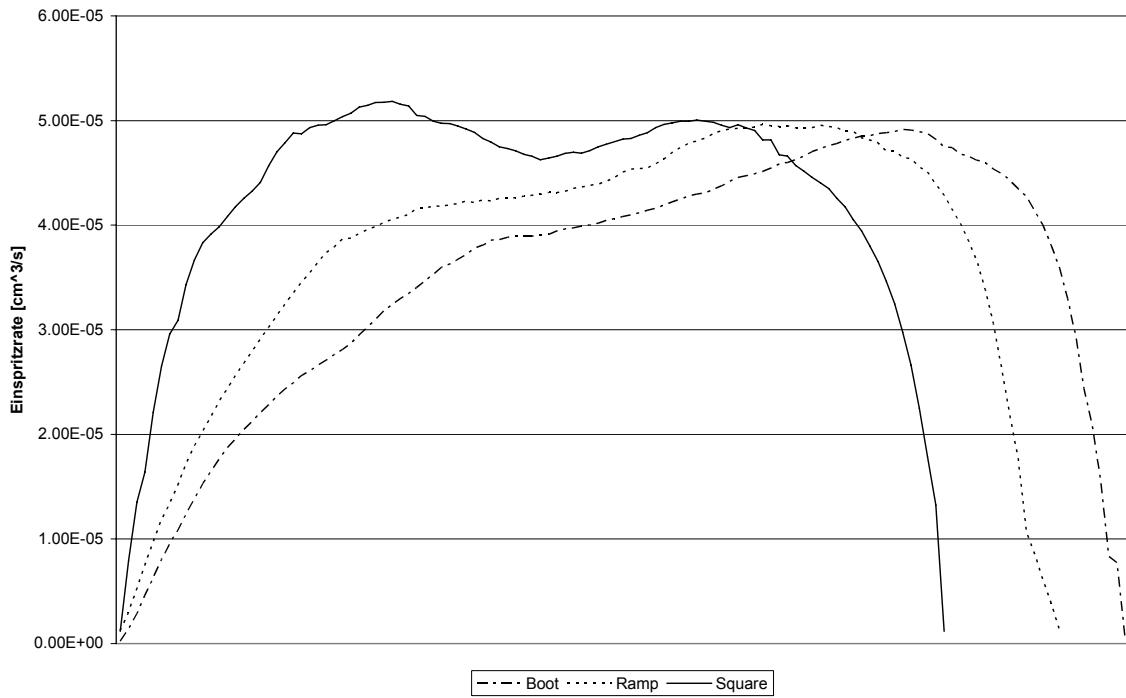
$$\frac{dm_{Soot,ox}}{d\varphi} = A_{ox} \cdot \frac{1}{\tau_{char}} \cdot (m_{Soot})^{n2} \cdot \left( \frac{p_{O_2}}{p_{O_2,ref}} \right)^{n3} \cdot e^{-\frac{TA,ox}{T}} \quad (3)$$

Für das Russmodell ist eine gute Abbildung der Wärmefreisetzung sehr wichtig. Da für den geplanten Liebherrmotor keine Messwerte und für dessen Vorgänger keine zufriedenstellenden Simulationsresultate bezüglich Druck und Wärmefreisetzung vorhanden sind wurde das Russmodell an einem Motor ausserhalb dieses Projektes durchgeführt (1 Zylinder 1lit. Common Rail Motor von Iveco). Für diesen Motor wurden schon umfangreiche Simulationen mit recht guten Resultaten durchgeführt. Dabei wurde wie folgt vorgegangen, die Parameter des Modells wurden mit bioinspirierten Algorithmen für eine Reihe von Messpunkten mit 0-D Simulation ermittelt und optimiert. Weitere Betriebspunkte wurden mit demselben Tool errechnet und dann mit den Messergebnissen verglichen. Dieselben Parameter sind in die 3-D Simulation übernommen worden. Die 3-D Ergebnisse sind somit eher mit den 0-D Ergebnissen zu vergleichen als mit den Messergebnissen, wobei die 0-D Ergebnisse schon gut mit den Messungen übereinstimmen sollten. In Figur 16 sind exemplarisch die neusten Ergebnisse für

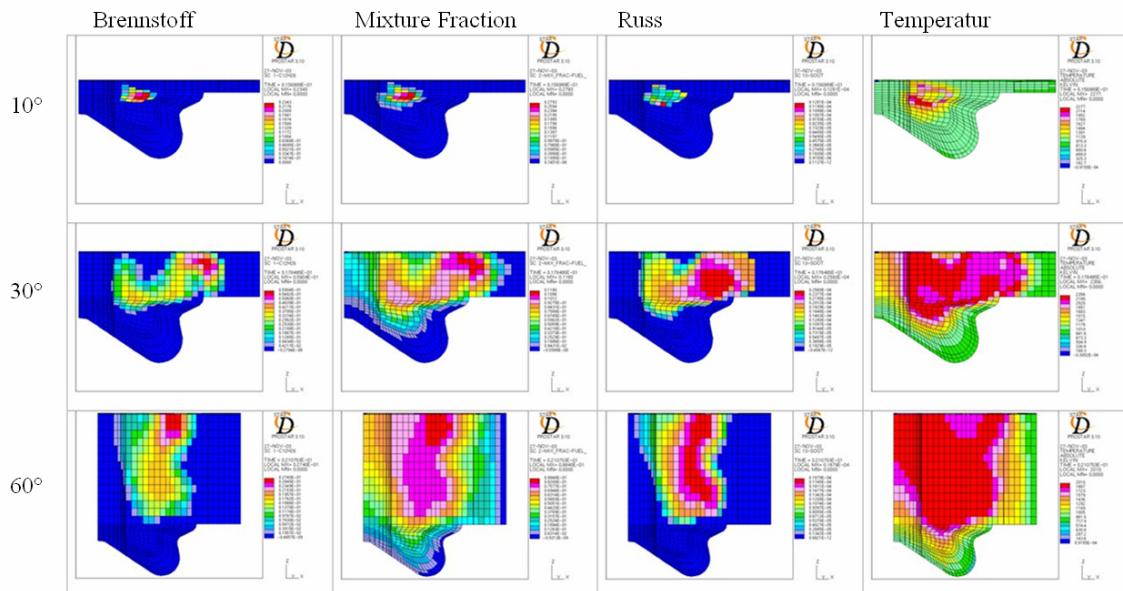
einen Betriebspunkt (typischerweise 75% Last) mit drei Verschiedenen Einspritzprofilen (Boot, Ramp, Square) dargestellt. Die verschiedenen Profile sind in Figur 17 dargestellt. Wie die Resultate in Figur 16 zeigen, wird der Trend der abnehmenden Russemissionen vom Boot- zum Ramp- und Square-Einspritzprofil sowohl von den 0-D als auch von den 3-D Simulationen wiedergegeben. Im Vergleich der beiden Simulationsarten zeigen sich zwar Unterschiede, doch sind die Resultate unter Berücksichtigung, dass das Russemissionsmodell in der 3-D Simulation scheinbare lokale Gegebenheiten im Brennraum mitberücksichtigt hingegen bei der 0-D Simulation nicht doch sehr gut. Solche lokalen Phänomene sind in den Schnittdarstellungen der 3-D Simulation in Figur 18 aufgezeigt. Ebenfalls kann in Figur 18 die Abhängigkeit der Russemission vom Brennstoff und Temperatur erkannt werden. Wie genau diese Verteilung im Brennraum quantitativ der Realität entspricht, wird sich mit dem Einsatz des FSV zeigen. Der Sinn, um überhaupt die Russbildung 3-D zu rechnen, besteht darin, dass einige Werte, die im 0-D 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.



**Figur 16:** Vergleich der Russemissionen erhalten aus Messung, 0-D sowie 3-D Simulation für den Betriebspunkt A (1550 U/min) mit 75% Last des IVECO Motors und drei verschiedenen Einspritzprofilen. Der Einspritzbeginn liegt im OT.



Figur 17: Die Verschiedenen Einspritzverläufe im Vergleich.



Figur 18: 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 Mixture fraction (Anteil Brennstoff in der einzelnen Zelle) ist gut ersichtlich.

#### 4. Schlussfolgerungen

Russ im Brennraum eines Verbrennungsmotors zeitlich und örtlich aufgelöst darstellen zu können, um darauf basierend neue und bezüglich der Emissionen, russarme Brennverfahren zu entwickeln, wurde in diesem Projekt teilweise erreicht. Das 3-D Modell liefert im vergleich mit dem entsprechenden 0-D Modell gute Resultate und lässt hoffen, dass die Verläufe ebenfalls der Wirklichkeit sehr nahe kommen.

Das Ziel, diese Verläufe mit Messungen zu belegen konnte nicht erreicht werden, da durch die immer wiederkehrenden Verzögerungen bei der Lieferung des Prüfmotors der Firma LIEBHERR andere Aspekte des Projekts bevorzugt und vertieft untersucht wurden; das Fast Sampling Valve wurde auf einen guten Stand gebracht und die nachgelagerte Messtechnik an der EMPA ist jetzt verfügbar. Zwar gibt es noch einige kleine Mängel am FSV zu korrigieren, ein baldiger Einsatz anfangs 2007 steht jedoch im Rahmen einer geplanten Zusammenarbeit mit der Industrie bevor.

## Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
$m_{Soot}$	Kg	Russmasse
$m_{Soot,form}$	Kg	Russmasse der Formation
$m_{Soot,ox}$	Kg	Russmasse der Oxydation
$\varphi$	°	Kurbelwinkel
$p_{O_2}$	N/m <sup>2</sup>	Sauerstoffpartialdruck
$p_{O_2,ref}$	N/m <sup>2</sup>	Sauerstoffpartialdruck der Umgebung
$p_{cyl}$	N/m <sup>2</sup>	Zylinderdruck
$p_{ref}$	N/m <sup>2</sup>	Umgebungsdruck
$T_{A,Ox}$	K	Aktivierungsenergie der Oxydation
$T_{A,form}$	K	Aktivierungsenergie der Formation
$\lambda_{form}$	-	Brennstoff – Luftverhältnis der Fromation
$n_1 \ n_2 \ n_3$		Modellparameter
$A_{form} \ A_{ox}$		Modellparameter
$\tau_{char}$	s	Charakteristische Zeit (für Durchmischung)

## Referenzen

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] J.E. Bennethum, J.N. Mattavi, R.R. Toepel: ***Diesel combustion Chamber Sampling – Hardware, Procedures, and Data Interpretation***, SAE 750849, 1975.
- [4] H. Zhao, G. Lowry, N. Ladommato: ***Time-Resolved Measurements and Analysis of In-Cylinder Gases and Particulates in Compression-Ignition Engines***, SAE 961168, 1996.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.