

Jahresbericht 2004, 13. Dezember 2004

Projekt Nr. 47336

Darstellung des Technologiepotentials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂ Ausstoss

Autor und Koautoren	P. Wilhelm, A. Bertola, 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	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 die Konstruktion der Internen Gas Entnahme Sonde (IGE – Sonde). Die Konstruktionsparameter für IGE – Sonde wurden sorgfältig erarbeitet, sodass die Probleme bei der Inbetriebnahme möglichst minimiert werden. Ebenfalls wurden die verwendeten Materialien minutiös ausgewählt, um auch bei den sehr fordernden Umgebungsbedingungen eine ansprechende Lebensdauer sicherzustellen. Das Verhalten der Gase während einer Entnahme mit der IGE – Sonde wurde mittels 3-D Rechnung (*StarCD*) simuliert. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen wurden Optimierungspfade erkannt und nach Möglichkeit genutzt.

Im Bereich der Messtechnik und Abgasanalytik wird mit der EMPA zusammengearbeitet. Die Vorbereitungen für die Probenahme und Partikelcharakterisierung sind durchgeführt worden. Ebenfalls wurden Erfahrungen mit einem elektrostatischen Probensammler für die mikroskopischen Analysen gesammelt. Zur Charakterisierung der Partikel wird die Anzahlgrössenverteilung (NSD), die Morphologie und – falls möglich – die Masse herangezogen.

Für den von der Firma LIEBHERR in Aussicht gestellten D934 DI-Dieselmotor mit Vierventiltechnik wurde ein 3-D Simulationsmodell erstellt und getestet. Aus Mangel an Messdaten konnte das Modell jedoch noch nicht validiert werden. Die visuelle Kontrolle der Ergebnisse deutet aber darauf hin, dass sinnvolle Resultate erwartet werden können. Nachdem sich die Lieferung des Motors immer weiter verzögerte, wurde für den zur Verfügung stehenden LIEBHERR D924 DI-Diesel Motor mit Zweiventilkopf ebenfalls ein 3-D Simulationsmodell entwickelt und validiert. Damit sollen nun zukünftige Messungen mit der IGE – Sonde verglichen werden.

Der neue LIEBHERR Vierzylinder Motor mit Vierventilkopf, Pumpe-Leitungs-Düse Einspritzsystem und interne Abgasrückführung (D 934L, erfüllt die „off-road“ Emissionsstufe TIER 3) wird voraussichtlich Ende März auf dem Prüfstand des LAV laufen. Es soll eine Bestandsaufnahme 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 PLD – Parametern, und evtl. Aufladung und Verdichtung untersucht.

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.

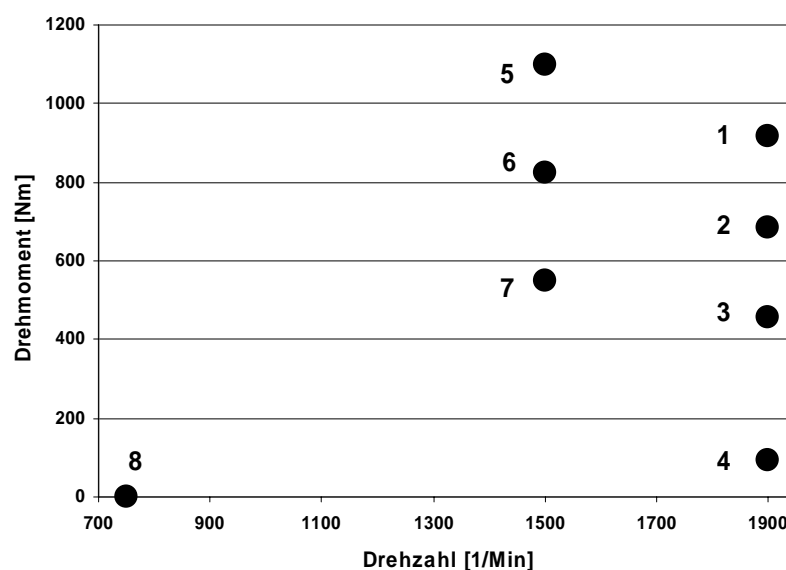


Fig. 1: Betriebspunkte für den LIEBHERR D 934 L Motor. Die Punkte 1-3 und 8 werden mit 0.15, die übrigen Punkte mit 0.1 gewichtet.

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 Öffnungsdauer und der gewonnenen Probemasse optimiert werden.

Nach der Erkenntnis aus ersten Berechnungen für das Bewegungsprofil (Nadelhubverlauf) wurde schnell klar, dass für solch kurzen Öffnungszeiten und trotzdem möglichst grossem Nadelhub extrem hohe Kräfte von Nöten sein werden. Diese sind vor allem mit Hydraulischen Antrieben erreichbar. Die Ansteuerung soll jedoch möglichst einfach sein. Daher wurde das Prinzip eines Common Rail Injektors übernommen und für die Angenommenen Rahmenbedingungen modifiziert. Der Hauptaugenmerk wurde auf die Auslegung der hydraulischen wirkenden Flächen gerichtet. Dabei wurden verschiedene Variationen der Kolben- und Drosseldurchmesser (vgl. Fig. 2.) analysiert. Die Kriterien welche beurteilt wurden waren folgende:

1. Öffnungsdauer (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 die „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. Für die Öffnungsgeschwindigkeit sind die nächsten Faktoren, „Drossel unten“ sowie „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 sie die Masse natürlich auch konstruktiv realisieren lassen. Ein Beispiel für eine Berechnungsserie ist in Fig. 3 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].

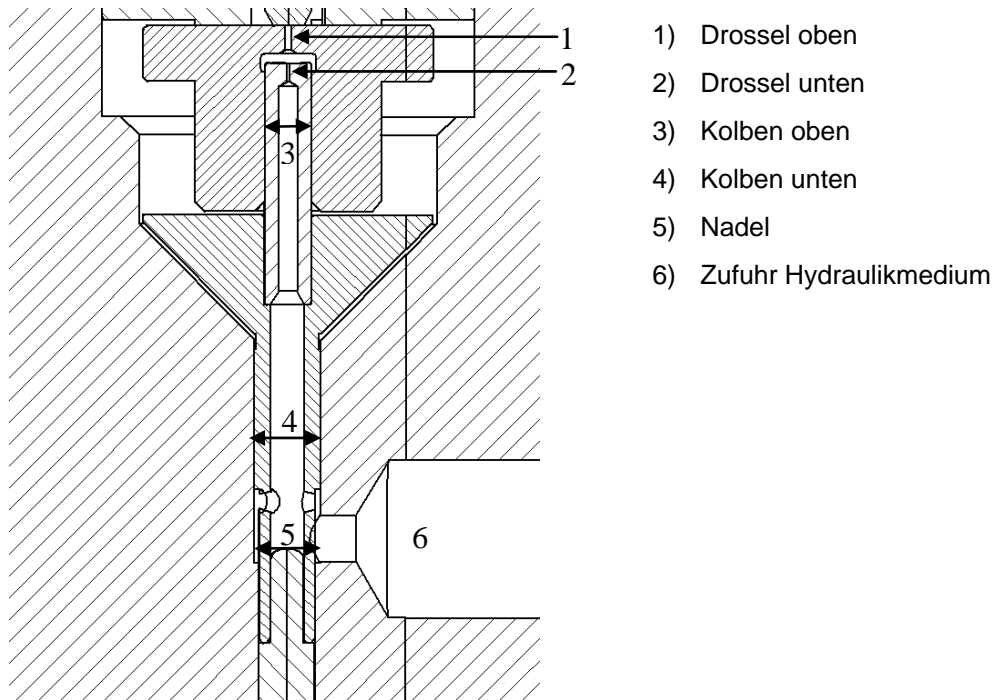


Fig 2: Schema des Hydraulikantriebs mit der Bezeichnung der hydraulisch wirkenden Flächen und Drosseln.

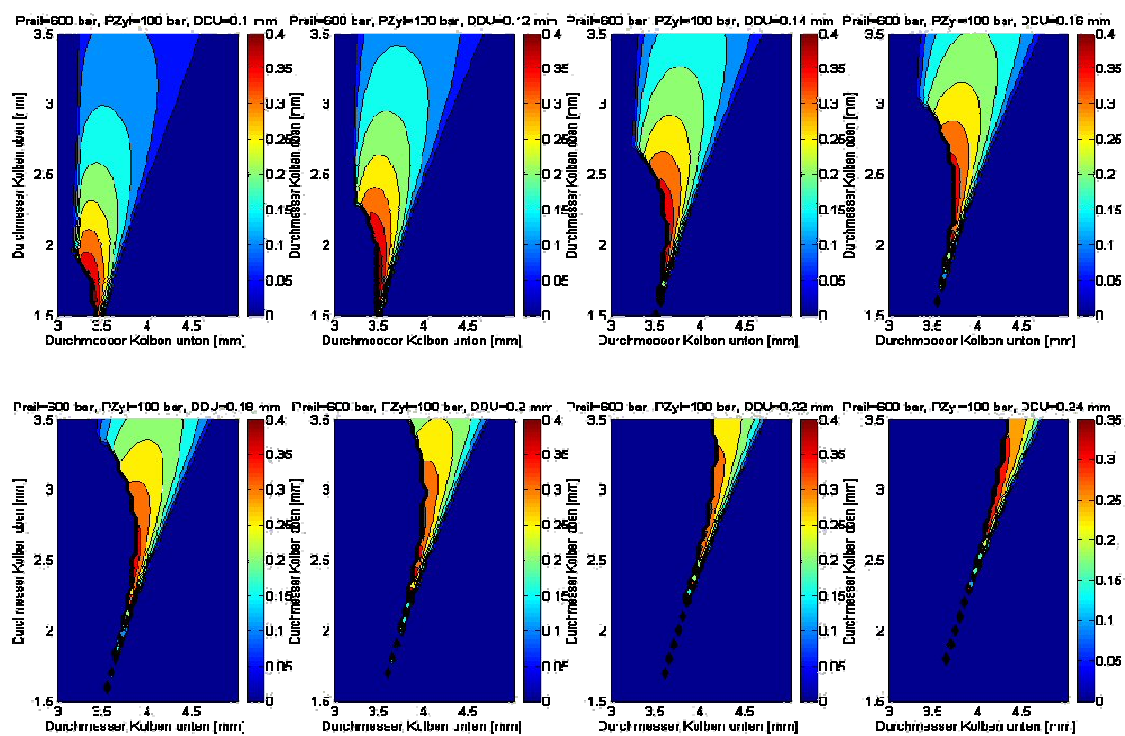


Fig 3: Berechnungsserie zur Ermittlung geeigneter hydraulischer Flächen und Drosseln für einen Raildruck von 600 bar, Zylinderdruck 100 bar und der oberen Drossel von 0.3 mm. Variation der unteren Drossel von 0.1 mm bis 0.24 mm.

Die für die IGE – Sonde verwendeten Grössen sind in der folgenden Tabelle 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

Tab 1: 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.

Eine weitere Anforderung war, das Messgas möglichst während der Entnahme zu verdünnen, wenigstens jedoch die Möglichkeit zu haben, die IGE – Sonde zu spülen. Dazu musste ein geeigneter Spülmechanismus entwickelt werden. Die gewählte Variante führt Spülgas durch die hohle Nadel zur Sondenspitze. Die Spülung wird durch drei Komponenten realisiert. Die Aufgabe der ersten Komponente (Fig. 4) 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 (Fig. 5). Diese Vorgabe stellte ebenfalls höchste Ansprüche an das Nadelmaterial. Die gefundene Lösung – ein, an der Spitze rund geschlossenes Keramikröhrchen – wird sich bei den ersten Messungen jedoch noch bewähren müssen. Jedoch wird durch den Einsatz dieses Bauteils ein sehr hochtemperaturfestes und dennoch für die Fertigung einfaches Material verwendet. Die dritte Komponente stellt den Übergang zwischen dem Keramikröhrchen und der metallischen Verbindung zum hydraulischen Aktuator her. Ebenfalls muss das Spülgas ins Röhrchen geleitet werden. Dieses Übergangsstück ist in Fig. 6 zu sehen (In eingebauten Zustand Fig. 4).

Zur Unterstützung der Konstruktion wurde der Spülmechanismus mit StarCD simuliert. In der Simulation wurde erkennbar, dass es voraussichtlich nicht möglich ist, während der Entnahme das Messgas zu verdünnen, da das Messgas mit einer enormen Geschwindigkeit in die IGE – Sonde strömt und das Verdünnungs- und Spülgas blockiert oder sogar retour drängt. Die Sequenz des Nadelöffnens ist in Tab. 2 dargestellt. Die schwarzen Bereiche stellen die Wände dar. Aus Symmetriegründen ist nur die rechte Hälfte der IGE – 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. In Tab. 3 ist die Spülphase dargestellt. Es ist 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 Parikelmesstechnik von der EMPA hergestellt.

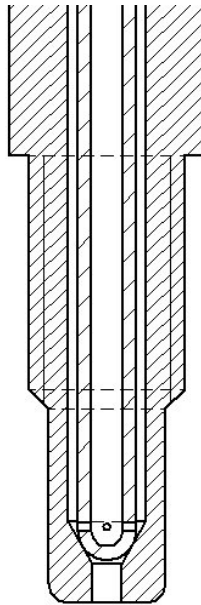



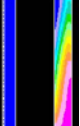


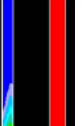


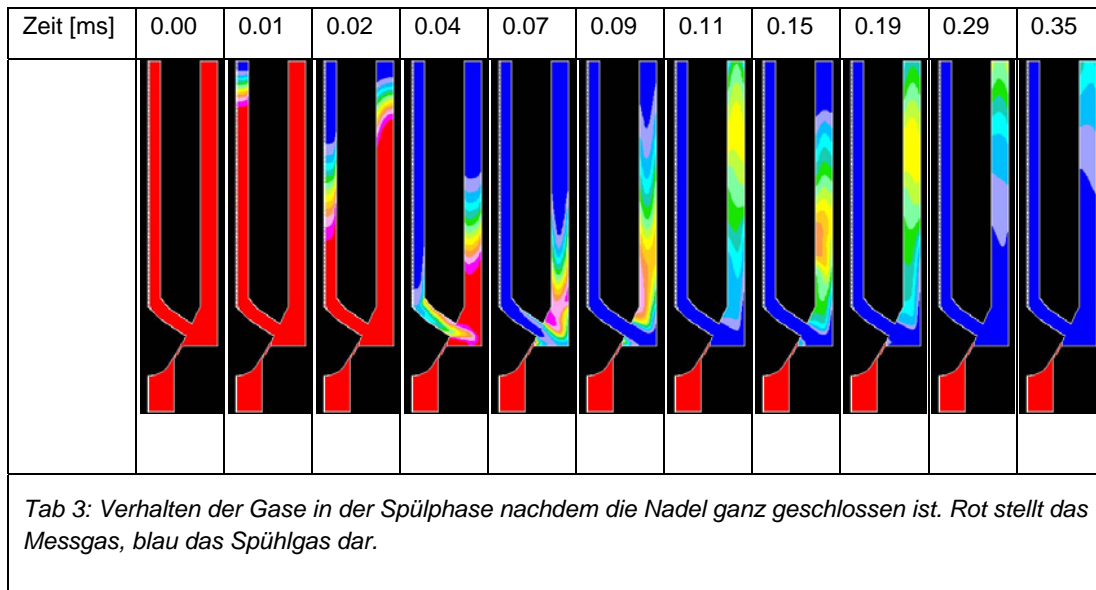


Fig. 5: Spühlmechanismus an der Spitze.

Übergangsstück.

Zeit [ms]	0.000	0.051	0.052	0.072	0.092	0.112	0.132	0.170	0.190
									

Tab 2: Verhalten der Gase während der Nadelöffnungsphase. Rot stellt das Messgas, blau das Spülgas dar.



Partikelmessstechnik

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. Da im Berichtsjahr der Motor noch 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.

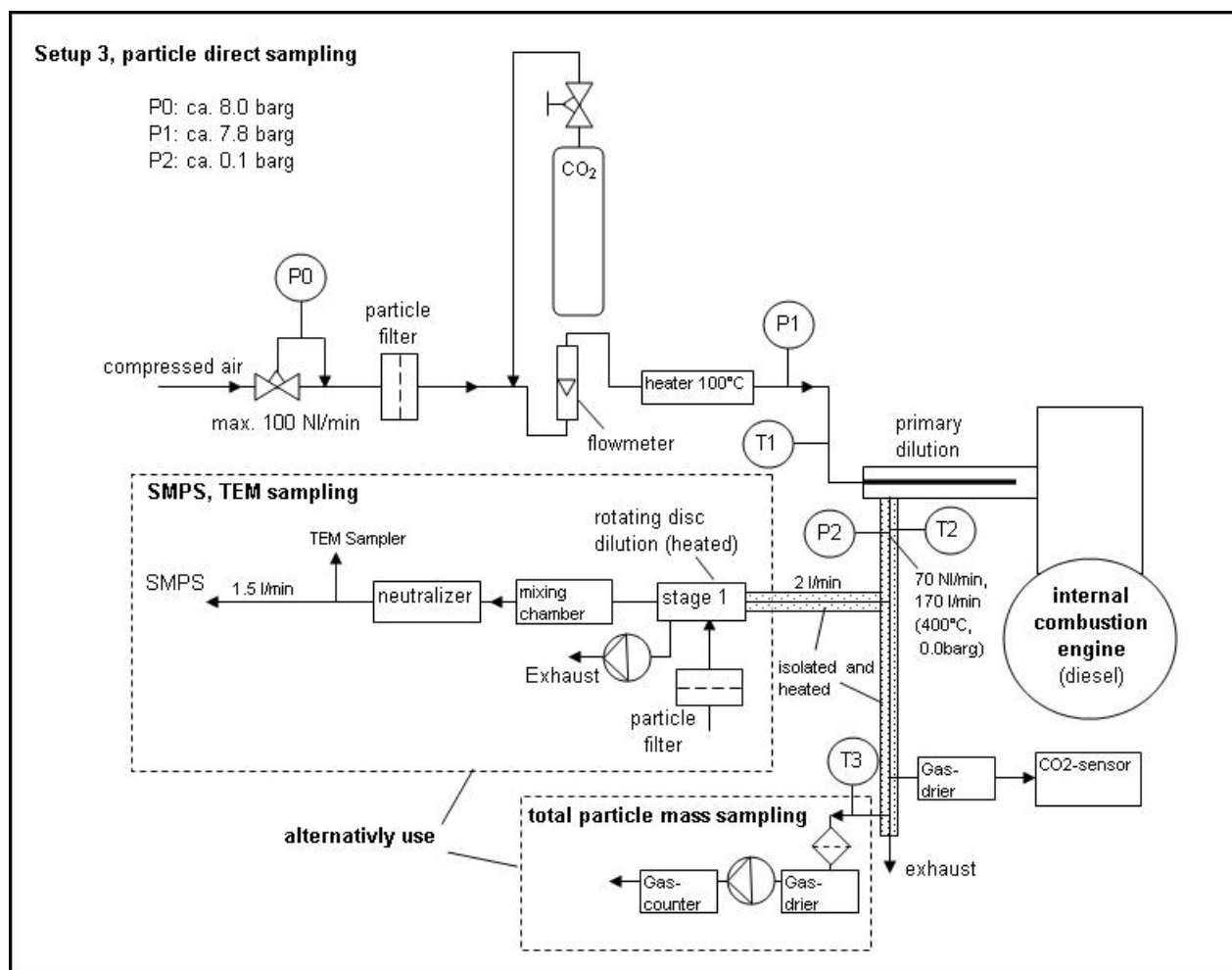


Fig. 7: Partikelmesssetup zur Analyse des Messgases aus der IGE – Sonde.

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. Mittlerweile ist die Auslegung des Motors fertig gestellt und der Motor wird Anfangs März hier in Zürich erwartet.

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 (Kap. Partikelmessstechnik).

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Die Konstruktion der IGE – Sonde benötigte mehr Zeit als ursprünglich angenommen. Dies geschah hauptsächlich auf Grund der damals noch nicht vorhandenen Kenntnis über die sich stellenden Probleme wie Materialwahl, Einbauort, Fertigung oder Toleranzen. Weiter erschwerend kam hinzu, dass die Firma LIEBHERR ihrerseits Probleme hatte die gewünschten Bauteile für den neuen Motor zu erhalten, und darum den Liefertermin häufig verschieben musste. Ebenfalls war die Geometrie des neuen Motors noch nicht definitiv ausgereift und musste immer wieder angepasst werden. Dies hatte für das Entnahmesystem ebenfalls Konsequenzen. Mittlerweile wurde uns aber versichert, dass wir die momentan „eingefrorene“ Version des D934 erhalten werden. Und die Sonde würde mit dieser Auslegung konstruiert. Im letzten Sommer wurde auf Grund der mangelnden Vorhersehbarkeit des Liefertermins entschieden, die Messungen vorerst am schon vorhandenen LIEBHERR D924 Motor durchzuführen. Dies hat nebenbei noch den Vorteil, dass dieser Motor schon sehr gut vermessen wurde und mittlerweile sehr flexibel eingesetzt werden kann. Letztendlich hat sich die kontinuierliche Verschiebung des Liefertermins für den D934 trotzdem sehr negativ auf die Fortschritte in der Entwicklung der IGE – Sonde ausgewirkt. Im Moment wird die Sonde fertig gestellt und soll zu Jahresbeginn verschiedenen Tests unterzogen werden, bevor sie dann gegen Ende des ersten Quartals am Motor eingesetzt wird.

Im Bereich der 3D-Simulationen wurde dieses Jahr vorerst das Setup für den neuen LIEBHERR Motor (D934) erstellt. Nach der Entscheidung vorerst den momentan aktuellen LIEBHERR Motor (D924) zu verwenden, wurde für diesen ebenfalls ein Setup erstellt und validiert. Im Moment sind verschiedene Rechnungen vorgesehen, um die umfangreichen Messdaten des D924 abbilden zu können. Darauf basierend wird nach Korrelationen mit den zukünftigen Messdaten der IGE - Sonde gesucht, um Aussagen über die lokale Russbildung machen zu können.

Mit der Ankunft des neuen Motors wird anfangs 2. Quartal 2005 gerechnet, was bezüglich dem geplanten Zeitplan eine nicht unwesentliche Verzögerung darstellt. Mit den Messungen für die Firma LIEBHERR soll gegen Jahresmitte begonnen werden. Daher werden die beiden Motoren D924 und D934 parallel betrieben.