

Jahresbericht 2002, 6. Dezember 2002

Projekt Nr. 33744

Common-Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren

Autor und Koautoren	A. Bertola, K. Boulouchos
beauftragte Institution	Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme der ETH Zürich
Adresse	Institut für Energietechnik/ LAV, ETH Zentrum, Sonneggstrasse 3, 8092 Zürich
Telefon, Internetadresse	01 6322475 (A. Bertola), www.lav.ethz.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	Common-Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren. / 33744
Dauer des Projekts (von – bis)	1. August 1999 – 31. Juli 2002

ZUSAMMENFASSUNG

Nachdem im Rahmen des Vorgängerprojektes „Swiss Common Rail“ am LVV / ETHZ bewiesen wurde, dass die EURO-III Normen prinzipiell ohne AGR und Abgasnachbehandlung mittels Hochdruck Common-Rail-Einspritzung erfüllt werden können, kommt die Motivation zum vorliegenden Projekt aus der Herausforderung, noch schärfere Emissionsgrenzwerte (Niveau EURO-IV) zu erfüllen.

Die Messungen am Vierzylindermotor bestätigen weitgehend das Potential der emissionsmindernde Massnahmen (Kombination von Hochdruckeinspritzung (Common-Rail) und gekühlter Abgasrückführung), die bereits am Einzylinder-Prüfstand erfolgreich appliziert und untersucht wurden [1], [2], [3] und [4]. Die Umsetzung vom 1-Zylinder zu 4-Zylinder Motor unterscheidet sich in der Kombination Abgasturbolader (Ladedruck) und Abgasrückführungsrate.

Zwei hochdruckseitige Abgasrückführungskonzepte (mit Positionierung der Abgas-Gegendruckklappe nach oder vor Turbine) wurden am Vollmotor implementiert. Gute Resultate wurden mit Abgasrückführungsraten von über 30% bei Teillast und bis zu 10% bei mittlerer Lasten erreicht. Emissionswerte unter den EURO-IV Grenzwert für Partikel und NO_x wurden bei Teillast nachgewiesen, bei hohen Lasten wurde das Emissionsverhalten durch die Verwendung von 8-Lochdüsen mit erhöhter Austrittsfläche verbessert.

Wir sind jedoch noch nicht im EURO IV Bereich, deswegen wird in den abschliessenden Messphasen versucht, mit Hochdruck-Einspritzung (Common-Rail-System), externe hochdruckseitige gekühlte Abgasrückführung mit erhöhtem Ladedruckverhältnis, Diesel-Wasser-Emulsionen (bis zu 35% Wasser) die EURO IV Grenzwerte in einem weiten Drehzahl- und Lastbereich zu erfüllen.

Projektziele

Um die im Jahre 2005 kommenden EURO-IV Normen zu erfüllen, werden verschiedene emissionsmindernde Massnahmen wie Hochdruckeinspritzung, externe gekühlte Abgasrückführung inkl. Anpassung des Abgasturboladers, Diesel-Wasser-Emulsionen, u.s.w. am Einzylinder- und an einem Vierzylindermotor erprobt. Die Erweiterung des Projektes um Diesel-Wasser-Emulsionen zu untersuchen wurde im Laufe des Projektes dazugezählt. Der Einfluss energieumsetzungsrelevanten Parametern auf die Emissionen im Motor wird somit systematisch geklärt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

KOMBINATION HOCHDRUCKEINSPRITZUNG UND GEKÜHLTE ABGASRÜCKFÜHRUNG

Der Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor (D 924 Ti-E A4) der Firma Liebherr wurde mit einem Common Rail Einspritzsystem bestückt und Anfangs 2002 in Betrieb genommen. Der Prototyp-Einspritzsystem weist folgende Komponenten auf: ETH/LVV Hochdruckpumpe, Injektoren der Firma Common Rail Technologies (Typ P2), Einspritzelektronik der Firma Bodensee Steuergeräte GmbH.

Ein Vergleich von EURO-III Basismessungen ohne Abgasrückführung, durchgeführt an einem Serie-Sechszylindermotor mit konventionellem Einspritzsystem (Reihenpumpe) bei der Firma Liebherr und am Vierzylindermotor des LAV mit Common-Rail-Einspritzsystem, zeigt das Potential des letzteren Systems in der Reduktion der Partikelemissionen bei unverändertem Kraftstoffverbrauch (Abbildung 1 und Abbildung 2).

Aus Abbildung 1 und Abbildung 2 kann entnommen werden, dass mit dem Einsatz des Common-Rail-Einspritzsystems die Partikelemissionen um Faktor 2 reduziert werden, bei konstantem Kraftstoffverbrauch und Stickoxydemissionen. Mit der Umsetzung unseres emissionsmindernde Konzeptes beinhaltend Hochdruckeinspritzung und gekühlte Abgasrückführung konnten sowohl die NO_x- wie auch die Partikelemissionen weiter reduziert werden. Das applizierte Prototyp-AGR-System (hochdruckseitige Abgasrückführung) gibt die Möglichkeit, nur bis zu mittleren Lasten Abgas zu rezirkulieren. Eine Gewichtung der 6 Prüfungspunkten im ESC-Testzyklus bei 25% und 50% Last ergibt NO_x- und Partikelwerte die knapp beim EURO-IV Grenzwert liegen. Der Kraftstoffverbrauch ist dabei ähnlich zu dem von EURO-III ohne AGR (Abbildung 2). Werden alle Prüfungspunkte im ESC-Zyklus berücksichtigt, ergeben sich im Schnitt höhere NO_x- und Partikelwerte (Abbildung 1). Die Betriebspunkte bei 75% und 100% Last, die ohne Abgasrückführung gefahren werden, sind für diese Erhöhung verantwortlich.

Aus Brennverlaufsanalysen hat es sich gezeigt, dass die verwendeten 6-Lochdüsen mit $D=0.210$ mm zu kleine Austrittsfläche für die Vollastpunkte aufweisen (die Brenndauer und die Einspritzzeit sind zu lang). Es wurden deswegen Düsen spitzen mit erhöhter Lochzahl beschaffen und eingesetzt; die entsprechenden Ergebnisse werden später diskutiert.

In Abbildung 1 und Abbildung 2 ist u.a. der Verlauf des spezifischen Kraftstoffverbrauchs in Funktion von Einspritzstrategien und AGR-Anteil für die betrachteten Punkte dargestellt. Klar zu sehen ist der Verbrauchsvorteil der Kurven mit Abgasrückführung gegenüber der Kurven ohne AGR.

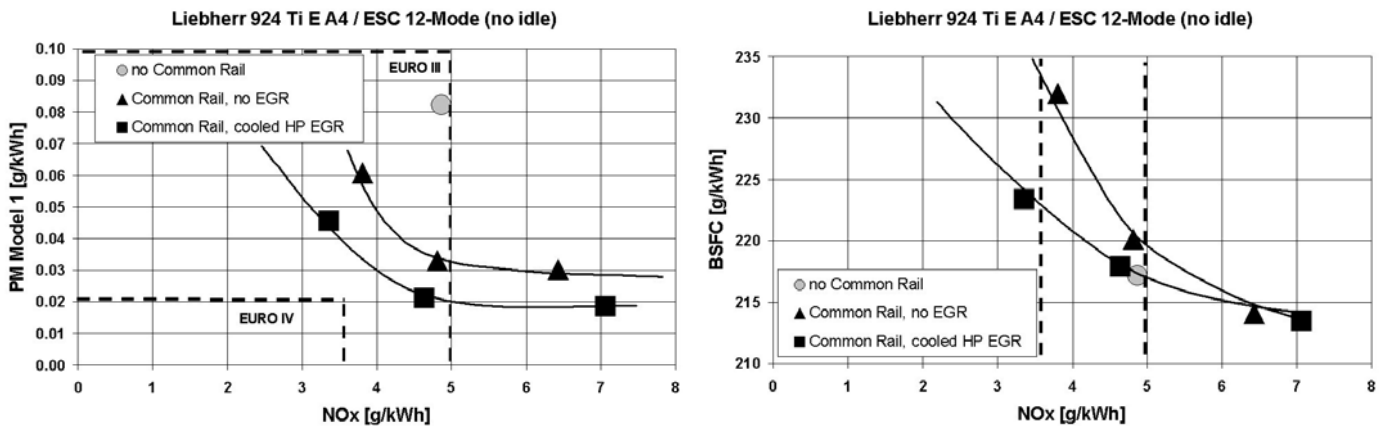


Abbildung 1: Tradeoffs Nox-Partikelemissionen und NOx-Kraftstoffverbrauch, Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor. Die Werte resultieren aus der Gewichtung von 12 Prüfungspunkten im ESC-Testzyklus. Die Variationen entlang der Kurven wurden mit unterschiedlicher Einspritzstrategien und AGR-Anteile realisiert.

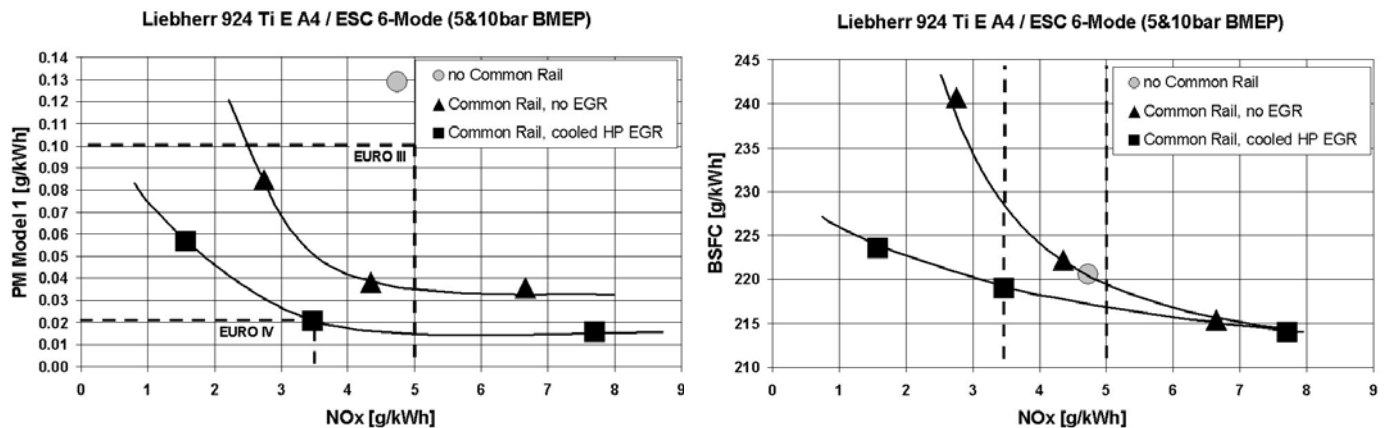


Abbildung 2: Tradeoffs Nox-Partikelemissionen und NOx-Kraftstoffverbrauch, Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor. Die Werte resultieren aus der Gewichtung von 6 Prüfungspunkten im ESC-Testzyklus. Die Variationen entlang der Kurven wurden mit unterschiedlicher Einspritzstrategien und AGR-Anteile realisiert.

Erst mit der Verwendung der gekühlten Abgasrückführung ist es möglich, das Potential eines Common-Rail-Einspritzsystems voll auszunützen (hohe Einspritzdrücke und optimale Einstellung des Spritzbeginns) um Abgasemissionen und Kraftstoffverbrauch zu minimieren. Wie Abbildung 3 zeigt, können die Partikelemissionen durch Erhöhen des Einspritzdruckes vermindert werden. Um die Stickoxydemissionen bei konstantem Einspritzdruck zu reduzieren muss (ohne AGR) der Spritzbeginn nach spät verlegt werden, was Verbrauchsnachteile mit sich bringt (auf der rechten Seite in Abbildung 3).

Der Motorbetrieb mit gekühlter Abgasrückführung jedoch bietet die Möglichkeit, trotz sehr hohen Einspritzdrücken (bis 1600 bar um den Partikelaustruss zu minimieren), die NOx-Emissionen auf extrem niedrige Werte (deutlich unter 1 g/kWh) runterzubringen. Abbildung 3 zeigt auch eine Optimierung des Spritzbeginns um den Kraftstoffverbrauch zu minimieren (Einspritzdruck 1400 bar, Einspritzbeginn 4 bzw. 10°KW vOTP). Durch die Applikation eines kleineren Abgasturboladers, um den Abfall des Kraftstoff/Luftverhältnisses mit steigender AGR-Rate zu reduzieren, wird in der nächsten Projektphase versucht die Partikelemissionen bei hohen AGR-Raten zu kontrollieren.

Durch detaillierte Brennverlaufsanalysen wurden die Auswirkungen der Parametervariationen auf dem Verbrennungsprozess untersucht [1]. Abbildung 5 zeigt dies exemplarisch für die Variation der AGR-Rate bei konstantem Einspritzdruck (jeweils 1400 und 1600 bar) [1] und [2].

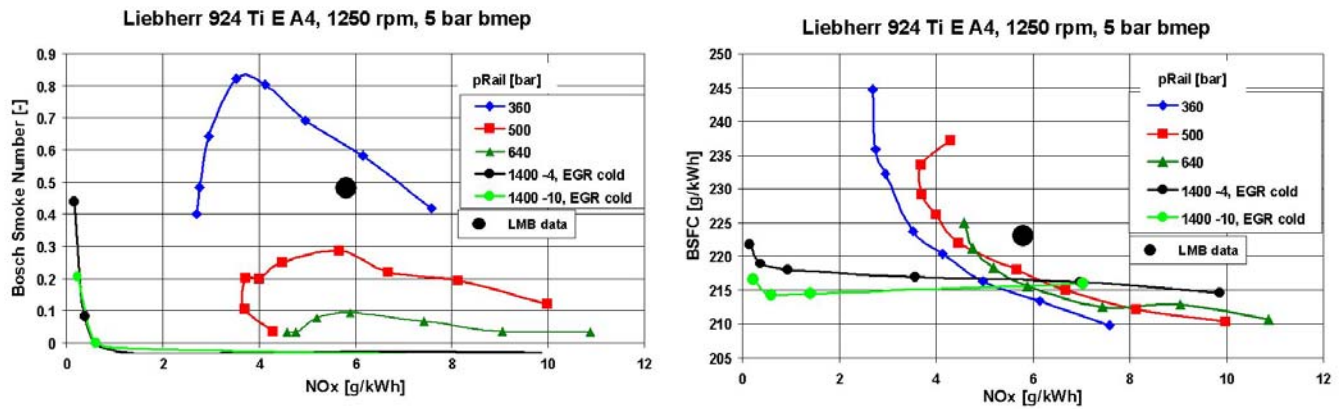


Abbildung 3: Tradeoff NOx-Partikelemissionen, Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor 1250 U/Min, 5 bar pme. Spritzbeginnvariation bei konstantem Einspritzdruck (360, 500 und 640 bar) und AGR-Variation bei konstantem Einspritzdruck (1400 bar).

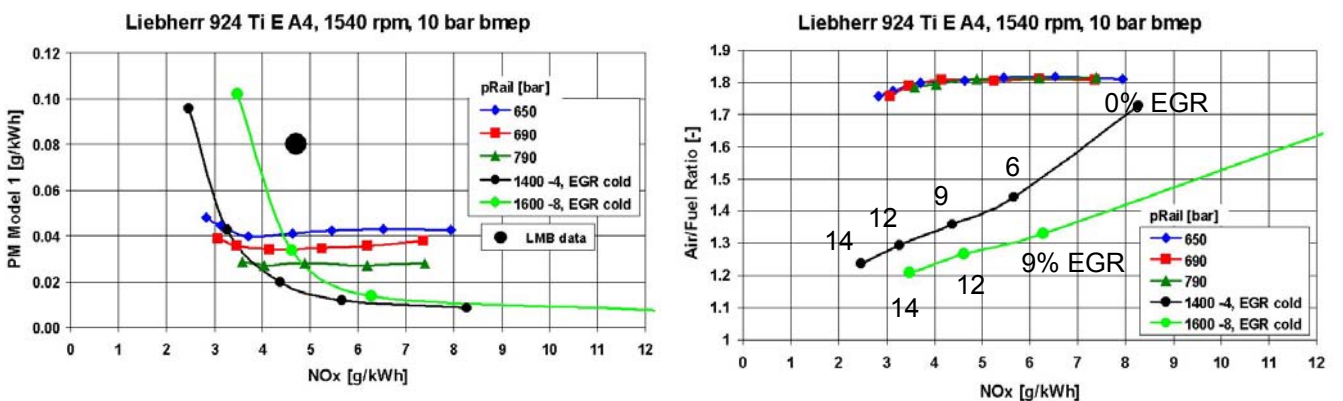


Abbildung 4: Tradeoffs NOx-Partikelemissionen und NOx-Luftverhältnis, Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor 1540 U/Min, 10 bar pme. Spritzbeginnvariation bei konstantem Einspritzdruck (650, 690 und 790 bar) und AGR-Variation bei konstantem Einspritzdruck (1400 und 1600 bar).

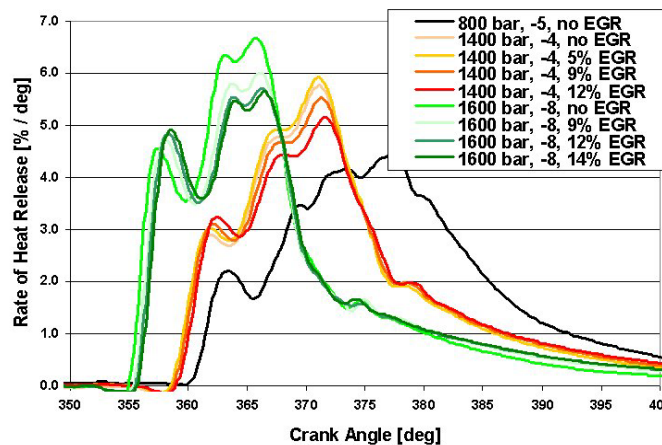


Abbildung 5: Brennverlauf, Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor 1540 U/Min, 10 bar pme.

INTERNE/ EXTERNE ABGASRÜCKFÜHRUNG

Für die Auslegung interner und externer Abgasrückführungskonzepte für Nutzfahrzeugdieselmotoren, wurde der Motorprozess (Vierzylinderdieselmotor mit Turbolader) mit dem thermodynamischen Simulationstool GT-Power simuliert. Die Validierung des Motormodells mit am Prüfstand gemessenen Daten zeigte gute Resultate (ohne und mit externer AGR). Für die interne Abgasrückführung wurden veränderte Ventilsteuerzeiten untersucht und optimiert [8]. Die interne Abgasrückführung hat, verglichen mit der externen AGR, deutliche Nachteile im Kraftstoffverbrauch. In Abbildung 6 ist dieser Sachverhalt, bei einem mittleren Drehzahl- und Lastpunkt klar zu sehen. Ausserdem sind für diese „heisse“ AGR-Variante die Zylinderladungstemperaturen markant höher (wichtig für die NO_x-Bildung). Durch externe, hochdruckseitige gekühlte Abgasrückführung können höhere Rückführraten, tiefere Zylinderladungstemperaturen, günstiger Kraftstoffverbrauch erzielt und somit die Stickoxydemissionen besser herabgesetzt werden. Aus diesem Grund wird die interne AGR am Motorprüfstand nicht erprobt.

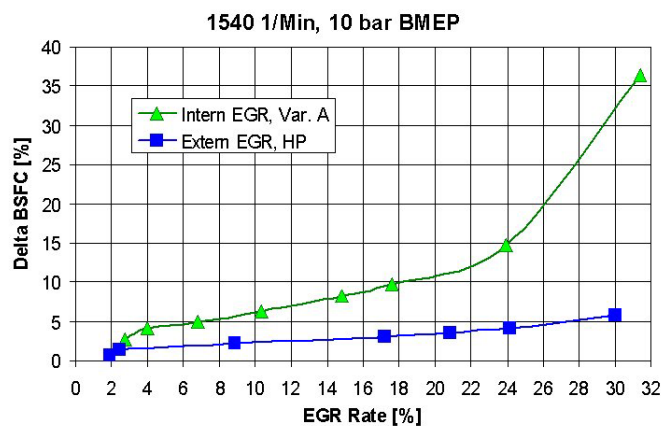


Abbildung 6: Tradeoff AGR-Kraftstoffverbrauch, Resultate der Prozesssimulation von interner und externer hochdruckseitigen Abgasrückführung am Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor bei 1540 U/Min, 10 bar pme.

ZWEI SYSTEMVARIANTEN DER EXTERNEN HOCHDRUCKSEITIGEN ABGASRÜCKFÜHRUNG

Durch Prozessrechnung wurden auch zwei Systemvarianten der externen hochdruckseitigen Abgasrückführung untersucht. Diese unterscheiden sich in der Positionierung der Abgas-Gegendruckklappe (vor bzw. nach Turbine), die während des Motorbetriebs mit AGR einen positiven Druckgradient im AGR-Pfad (vom Abgas zur Frischluftseite) erzeugt. Die motorischen Ergebnisse der praktischen Umsetzung dieser Variante bestätigen die Resultate der Simulationen. Wie aus Abbildung 7 zu entnehmen ist, verschiebt sich der Anstiegspunkt der Partikelemissionen für die Variante „Drossel vor Turbine“ zu höheren AGR-Raten. Dies ist auf dem höherem globalen Kraftstoff/Luftverhältnis dieser Variante bei hohen AGR-Raten zurückzuführen. Bei hohen AGR-Raten ist der Kraftstoffverbrauch günstiger da die Drosselstelle vor der Turbine platziert ist. Der Abgas wird immer bis zum gleichen Druck expandiert, was bei der Variante „Drossel nach Turbine“ nicht der Fall ist. Bei der Variante „Drossel vor Turbine“ bleibt die Turboladerdrehzahl hoch mit steigender AGR-Rate, der Ladedruck fällt weniger ab und das globale Kraftstoff/Luft-Verhältnis bleibt höher.

Allerdings ist die bisher verwendete Turbine (Standard für den Serie-Motor ohne AGR) eher zu gross. Ein nächster Optimierungsschritt besteht in ihrer Verkleinerung (in zwei Stufen) für höhere Ladedrücke.

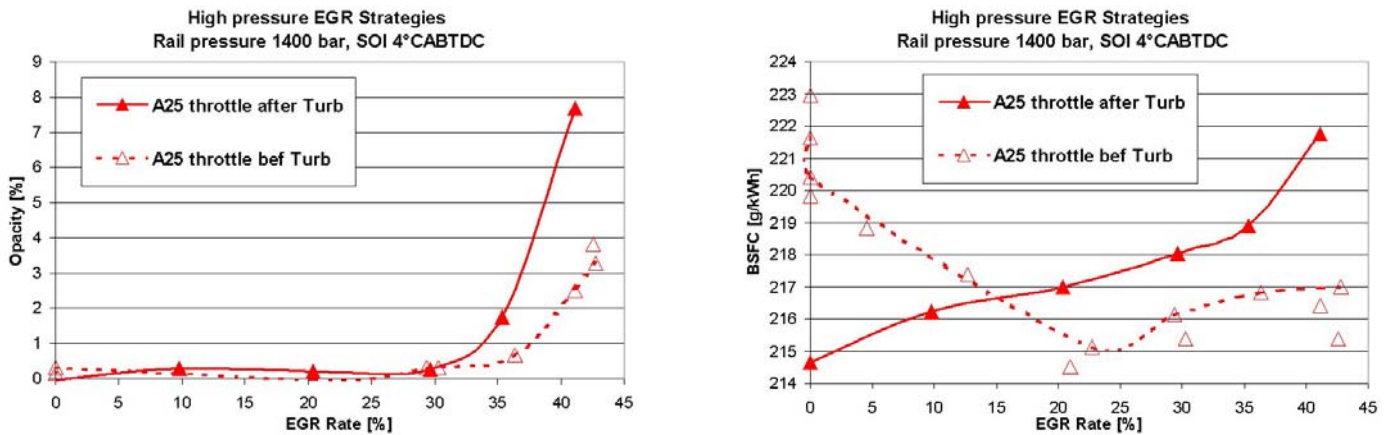


Abbildung 7: Tradeoffs AGR-Partikelemissionen und AGR-Kraftstoffverbrauch für die Systemvarianten „Drosseln vor Turbine“ und „Drosseln nach Turbine“, Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor 1250 U/Min, 5 bar pme.

MODIFIKATION DER DÜSENSPITZEN

Die Injektoren mit 6-Lochdüsen (6x0.210 mm) wiesen zu kleine Austrittsfläche auf. Diese wurden somit mit 8-Lochdüsen (8x0.200 mm) ersetzt um das Emission- und Verbrauchsverhalten bei hohen Lasten zu verbessern. Abbildung 8 zeigt gemessene Zylinderdruckverläufe und berechnete Brennverläufe für den Betriebspunkt 1250 U/Min, 75% Last. Ersichtlich ist die kürzere Brenn-dauer für die Messungen mit 8-Lochdüsen. Wie zu erwarten ist, sind für diese Konfiguration die Partikelemissionen etwas tiefer und die NO_x-Emissionen etwas höher aufgrund des grösseren Vormischanteils der Verbrennung.

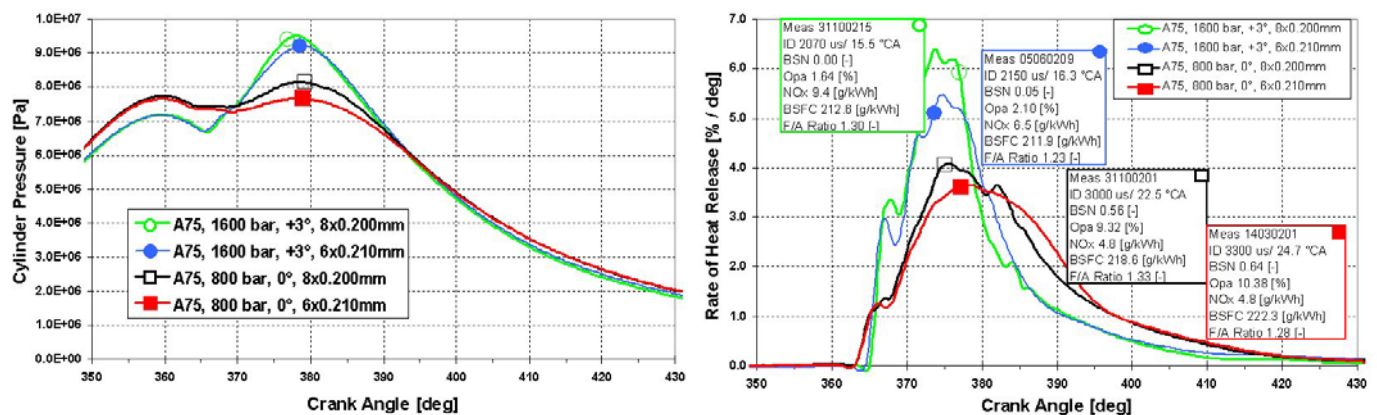


Abbildung 8: Indizierter Zylinderdruck und berechneter Brennverlauf. Variation der Injektor-Düsen (6-Lochdüse bzw. 8-Lochdüse) bei gleichen Einspritzparametern. Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor 1250 U/Min, 15 bar pme.

Nationale Zusammenarbeit

Alle gezeigten Resultate sind in Zusammenarbeit mit der Industrie entstanden und weisen ein hohes Mass an Praxisnähe auf. Insbesondere die Firma LIEBHERR Machines Bulle S.A. ist mitverantwortlich für das Messprogramm und profitiert direkt von den gezeigten Resultaten. Im Bereich Einspritzsystem arbeiten wir mit der Firma Common Rail Technologies AG zusammen, die mit Bezug auf die Entwicklung von neuen Injektoren auch von unseren Resultaten profitiert.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die Messungen am Vierzylindermotor bestätigen das Potential der emissionsmindernde Massnahmen (Kombination von Hochdruckeinspritzung (Common Rail) und gekühlter Abgasrückführung), die bereits am Einzylinder-Prüfstand erfolgreich appliziert und untersucht wurden [1], [2], [3] und [4].

Zwei hochdruckseitige Abgasrückführungskonzepte wurden am Vollmotor implementiert. Emissionswerte unter EURO-IV wurden bei Teillast nachgewiesen, bei hohen Lasten wurde das Emissionsverhalten durch die Verwendung von 8-Lochdüsen mit erhöhter Austrittsfläche verbessert. Zusätzliche emissionsmindernde Massnahmen wie Erhöhung des Luftverhältnis beim Betrieb mit AGR durch Verkleinerung des Abgasturboladers und den Einsatz von Diesel-Wasser-Emulsionen zur weiterer Senkung von Partikel und NOx werden am Vierzylindermotor erprobt.

Im Jahre 2003 wird versucht, mit folgenden Möglichkeiten die EURO IV Grenzwerte in einem weiten Drehzahl- und Lastbereich zu erfüllen:

- 1.) Hochdruck-Einspritzung, Common-Rail System (wie bis anhin)
- 2.) Externe, gekühlte Abgasrückführung mit erhöhtem Ladedruckverhältnis
- 3.) Diesel-Wasser-Emulsionen (neu Erweiterung des ursprünglichen Vorhabens)

Der Abschluss des Projektes inkl. Dokumentation und Schlussbericht ist für Mitte 2003 vorgesehen.

Referenzen

- [1] R. Schubiger, A. Bertola, K. Boulouchos. ***Influence of EGR on Combustion and Exhaust Emissions of Heavy Duty DI-Diesel Engines Equipped with Common Rail Injection Systems***, SAE Paper Nummer 2001-01-3497.
- [2] A. Bertola, R. Schubiger, K. Boulouchos, et. al, ***Characterization of Diesel Particulate Emissions in Heavy Duty DI-Diesel engines with Common Rail Fuel Injection: Influence of Injection Parameters and Fuel Composition***, SAE Paper Nummer 2001-01-3573.
- [3] T. Lutz, A. Bertola, R. Schubiger, K. Boulouchos, C. Nellen, K. Schänzlin et Al., ***Particulates of Piston Engine Combustion Processes***, Final Report, Zurich Nov 2001.
- [4] R. Schubiger: ***Untersuchungen zur Russbildung und -oxidation in der dieselmotorischen Verbrennung: Thermodynamische Kenngrössen, Verbrennungsanalyse und Mehrfarbenendoskopie***, Dissertation Nr. 14445, 2001.
- [5] S. Aufdenblatten, K.Schänzlin, A.Bertola, et. Al, ***Charakterisierung der Partikelemission von modernen Verbrennungsmotoren***, MTZ 11/2002, Jg. 63.
- [6] M. Regolatti, F. Noembrini, A. Bertola, ***Auslegung und Simulation von Abgasrückführungskonzepten für aufgeladene Nutzfahrzeugdieselmotoren***, Semesterarbeit LVV WS01/02