

Schlussbericht 2003, 29. März 2004

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

Die Messungen am Vierzylindermotor bestätigen weitgehend das Potential der Emissionsmindernden Massnahmen (Kombination von Common-Rail Hochdruck-Einspritzung und gekühlter Abgasrückführung), die bereits am Einzylinder-Prüfstand erfolgreich appliziert und untersucht wurden [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Die Umsetzung vom 1-Zylinder zu 4-Zylinder Motor unterscheidet sich in der Kombination Abgasturbolader (Ladedruck) und Abgasrückführungsrate im Motorkennfeld.

Emissionswerte unter den EURO-IV Grenzwert für Partikel und NO_x wurden bei Teillast mit Dieselmotorkraftstoff nachgewiesen. Anschliessend wurde versucht, mit Hochdruck-Einspritzung (Common-Rail-System), externe hochdruckseitige gekühlte Abgasrückführung mit erhöhtem Ladedruckverhältnis, Diesel-Wasser-Emulsionen (bis zu 30% Wasser) die EURO-IV Grenzwerte in einem weiten Drehzahl- und Lastbereich zu erfüllen. Um den Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung möglichst genau zu charakterisieren, wurden bei den motorischen Versuchen verschiedene Einspritzstrategien verfolgt. Die Messung von Partikelgrössenverteilungen hat sich hier als unabdingbar erwiesen, um extrem tiefe Partikelkonzentrationen im Abgasstrom noch charakterisieren zu können. Die Kombination von gekühlter Abgasrückführung, Hochdruckeinspritzung und Verwendung von Emulsionen erlaubte die Minimierung der Partikelemissionen bei gleichzeitig niedrigen NO_x-Werten [1], [2], [3], [4].

Mit Hilfe von Prozessimulationen konnten unterschiedliche Abgasrückführungsconfigurationen am selben Motor untersucht und optimiert werden (intern ungekühlt, extern hochdruckseitig gekühlt, extern niederdruckseitig gekühlt). Betreffend Kraftstoffverbrauch und erreichbarer maximaler Rückfuhraten im Motorkennfeld ist die externe niederdruckseitige gekühlte AGR den anderen beiden Konzepten deutlich überlegen und könnte zudem durchaus in Zukunft, beispielsweise durch den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen, an Bedeutung gewinnen.

Die möglichen innermotorischen Massnahmen zur Emissionsminderung in Hinblick auf zukünftige Emissionsgrenzwerte wurden somit ausgeschöpft [1]. Die gezeigten Ergebnisse stellen eine solide Entscheidungsgrundlage für die Industrie dar.

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 von thermochemischen (Abgasrückführungsrate, Phasenlage der Einspritzung, Sauerstoffgehalt in Luft und Kraftstoff) und strömungsmechanischen Grössen (Einspritzdruck, Mischungsfrequenz) sowie von reaktionskinetischen Parametern wird systematisch analysiert. Dabei wird sowohl auf die Minimierung der Partikelemissionen bei niedrigen NO_x-Werten als auch auf die Untersuchung von Extremfällen im NO_x-PM Tradeoff besonderer Wert gelegt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

KOMBINATION HOCHDRUCKEINSPRITZUNG UND GEKÜHLTE ABGASRÜCKFÜHRUNG

Ein 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 (Saug-Drosselung), Injektoren der Firma Common Rail Technologies (Typ P2), Injektor-Düsen spitzen der Firma Bosch, Einspritzelektronik der Firma Bodensee Steuergeräte GmbH.

Mit der Umsetzung unseres emissionsmindernden Konzeptes beinhaltend Hochdruckeinspritzung und gekühlte Abgasrückführung konnten sowohl die NO_x- wie auch die Partikelemissionen signifikant reduziert werden im Vergleich zum Serien-Motor mit konventioneller Einspritzpumpe und ohne AGR. Das applizierte Prototyp-AGR-System (hochdruckseitige Abgasrückführung) erlaubte, bedingt durch den Turbolader, nur bis mittleren Lasten Abgas zu rezirkulieren.

Wie Abbildung 1 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 (Abbildung 1). Die Erfüllung des EURO-III Grenzwertes wurde zuerst durch optimierte Einspritzstrategien auf diese Weise erreicht.

Um weitere signifikante Reduktionen von PM und NO_x zu erzielen mussten jedoch neue Verbrennungskonzepte entwickelt werden. Der Motorbetrieb mit gekühlter Abgasrückführung bietet die Möglichkeit, trotz sehr hohen Einspritzdrücken (bis 1600 bar um den Partikelaustritt zu minimieren), die NO_x-Emissionen auf extrem niedrige Werte (deutlich unter 1 g/kWh) runterzubringen. Partikel- und NO_x-Werte knapp unter dem EURO-IV Grenzwert wurden bei tiefen Motorlasten unter Verwendung maximaler Einspritzdrücken und hohe AGR-Raten erzielt, wie beispielhaft in Abbildung 1 gezeigt. Wird der Verlauf des spezifischen Kraftstoffverbrauchs in Funktion von Einspritzstrategien und AGR-Anteil betrachtet, ist der Verbrauchsvorteil der Kurven mit Abgasrückführung gegenüber den Kurven ohne AGR klar zu sehen.

Werden alle Prüfpunkte im ESC-Zyklus berücksichtigt, ergeben sich im Schnitt höhere NO_x- und Partikelwerte (Abbildung 9). Die Betriebspunkte bei 75% und 100% Last, welche ohne Abgasrückführung gefahren werden und relativ tiefe globale Lambda-Werte aufweisen, sind für diese Erhöhung verantwortlich.

Partikelgrössenverteilungen im Abgas wurden in Zusammenarbeit mit Fachspezialisten der EMPA (Abt. Motoren und Feuerungen) gemessen. Die aus diesen Messungen resultierenden Informationen über Anzahl und Konzentration der Partikel sind relevant für die

Verbrennungsoptimierung. Abbildung 2 zeigt exemplarisch der Einfluss des Einspritzdruckes auf die Partikelemissionen in Kombination mit Abgasrückführung. Die Messergebnisse bestätigen dass eine Reduktion der totalen Partikelmasse eine Verminderung der Anzahl Partikel mit sich bringt. Während Abgasrückführung zu höheren Partikelkonzentrationen führt, bewirkt die Erhöhung des Einspritzdruckes eine Reduktion des mittleren Partikeldurchmessers und der totalen Anzahl Partikel. In diesem Zusammenhang konnten die Erkenntnisse, die am Einzylindermotor in einer früheren Projektphase gewonnen wurden, weitgehend bestätigt werden [7], [8], [9].

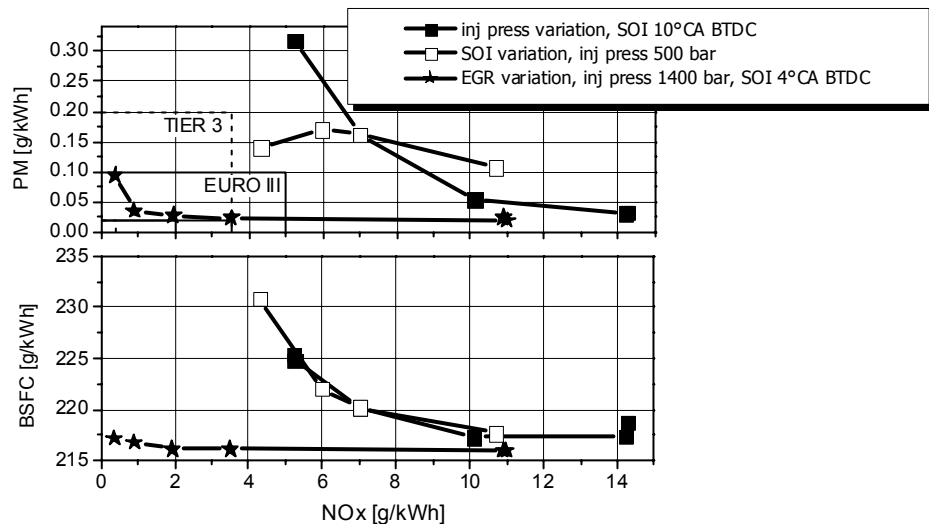


Abbildung 1: Tradeoffs NOx-Partikelemissionen und NOx-Kraftstoffverbrauch. Betriebsbedingung 1250 U/Min, 25% Last. Einspritzdruckvariation bei konstanter Einspritzbeginn; Einspritzbeginnvariation bei konstanter Einspritzdruck; AGR Variation bei konstanter Einspritzbeginn und Einspritzdruck. Die Partikelemissionen wurden mit der gravimetrischen Methode bestimmt (Abgas-Teilstromverdünnung mittels Smartsampler und Filter-Belegung).

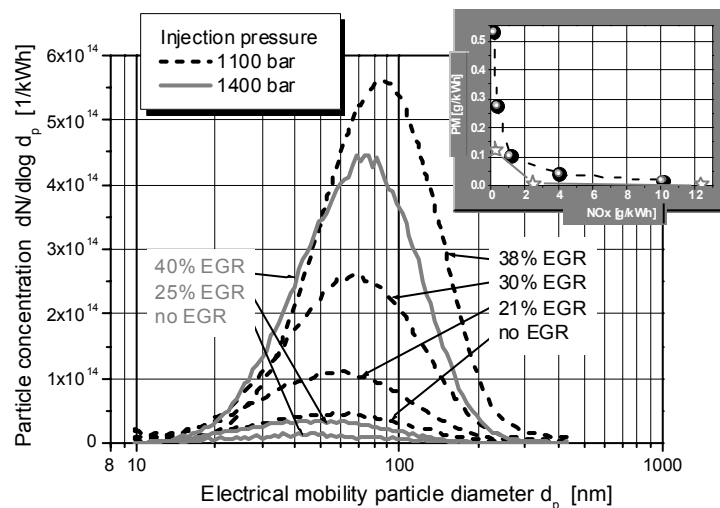


Abbildung 2: Partikelgrößenverteilung (ohne Thermodesorber) und Tradeoff NOx-Partikelemissionen. Variation von AGR-Rate für zwei Einspritzdrücke. Betriebsbedingung 1250 U/Min, 25% Last, Einspritzbeginn konstant (4° vor OTP), Dieseldieselfuelstoff.

MODIFIKATION DER KRAFTSTOFFZUSAMMENSETZUNG

Wasser-Diesel Emulsionen bieten die Möglichkeit NO_x und Partikelemissionen gleichzeitig zu reduzieren, deshalb wurde diese Kraftstoffart im Rahmen dieses Projektes näher untersucht. Die Messungen wurden mit drei Wasser-Diesel Emulsionen mit unterschiedlichem Wassergehalt (13%, 21%, 30% Wasser) durchgeführt; Emulsionen mit 13% und 20% Wasser sind kommerziell verfügbar für Fahrzeugflotten in Europa bzw. USA. Die Emulsion mit 30% Wasser wurde spezifisch für die Untersuchungen am LAV vorbereitet, höhere Wasseranteile konnten uns aus technischen Gründen leider nicht zur Verfügung gestellt werden.

Wasser-Diesel Emulsionen wurden systematisch untersucht: Hauptparameter wie Motorlast, Phasenlage der Einspritzung, Einspritzdruck und Abgasrückführungsrate wurden umfassend variiert um Verbrennung und Emissionen genau Charakterisieren zu können. Die Umsetzung unterschiedlicher Einspritzstrategien ermöglichte uns, detaillierte und neuartige Ergebnisse in diesem Gebiet zu gewinnen. Zum einen wurden die verschiedenen Kraftstoffe mit dem gleichen Druck im Brennraum eingespritzt, zum anderen wurde der Einspritzdruck erhöht um die gleiche Einspritzdauer (auch konstante zugeführte Energierate) wie mit dem Referenz-Kraftstoff Diesel zu haben. Wir haben festgestellt, dass bei konstantem Einspritzdruck sowohl Partikel wie auch NO_x-Emissionen durch das Wasser im Kraftstoff vermindert werden. Die NO_x Reduktion ist auf das kühlende Effekt des verdampfenden Wassers zurückzuführen, im Mittel haben wir hier 10% NO_x-Reduktion pro 10% Wasser im Kraftstoff registriert. Wird die Einspritzdauer konstant gehalten, dann bleiben die NO_x Emissionen für die Kraftstoffvariation konstant. Die Reduktion der Partikelemissionen bei Verwendung von Wasser-Diesel Emulsionen ist in den Abbildungen 3 und 4 ersichtlich. Die Partikelgrößenverteilungen zeigen immer eine Verminderung der Partikelkonzentration im Akkumulations-Modus, welche proportional zum Wasseranteil im Kraftstoff ist. Wenn die Anzahl Partikel im Akkumulations-Modus gering ist, wurden zum Teil höhere Partikelkonzentrationen im Nukleations-Modus mit Wasser-Diesel Emulsionen als mit Diesel registriert (Abbildung 3). Diese ultrafeine Partikel konnten durch die Zuschaltung eines Thermodesorbers nicht vollständig eliminiert werden, was den Hinweis gibt, dass diese Festpartikel aus Additive (z.B. Emulgator-Substanzen) in den Wasser-Diesel Emulsionen gebildet werden.

Wasser-Diesel Emulsionen wurden auch in Kombination mit Abgasrückführung getestet. Sehr tiefe NO_x Emissionen konnten durch hohe Abgasrückführungsrate bei tiefen bis mittleren Motorlasten nachgewiesen werden. Abbildung 5 zeigt z.B. dass NO_x Werte unter 1 g/kWh mit 38% AGR-Rate mit Diesel und die 13% Wasser-Diesel Emulsion erreicht wurden. Die Verwendung von Wasser-Diesel Emulsionen und AGR hat sich sehr effizient erwiesen um beide Hauptemissionskomponenten zu minimieren, (siehe auch Abbildung 7, linke Grafik).

Durch detaillierte Brennverlaufsanalysen wurden die Auswirkungen der Parametervariationen auf den Verbrennungsprozess untersucht [1]. Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Brennverläufe für die untersuchten Kraftstoffe für beide Einspritzstrategien (konstanter Einspritzdruck oder konstante Einspritzdauer) ohne Abgasrückführung. Die Messungen zeigen eindeutig, dass mit Wasser-Diesel Emulsionen die Gemischaufbereitung besser ist als mit Dieselmotorkraftstoff. Ersichtlich sind auch der längere Zündverzug, welcher proportional zum Wasseranteil im Kraftstoff ist, und den dementsprechend grösseren Anteil an vorgemischter Verbrennung, (siehe auch Abbildung 7, rechte Grafik). Sehr Interessant ist der Verlauf der maximale adiabate Flammtemperatur in Abhängigkeit von AGR-Rate und Wasseranteil im Kraftstoff (Abbildung 8, rechte Grafik). Deutlich ist der dominante Einfluss von AGR auf die Temperatur, was sich ebenfalls auf den gemessenen NO_x-Werten niederschlägt.

Neue Erkenntnisse über die Verbrennung und das Emissionsminderungspotential von Wasser-Diesel Emulsionen wurden veröffentlicht: an der *7th International ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles* (August 2003 in Zürich) wurde ein Beitrag präsentiert [3], an der *SAE Powertrain & Fluid Systems Conference* (Oktober 2003 in Pittsburgh USA) wurde ein Paper publiziert [2].

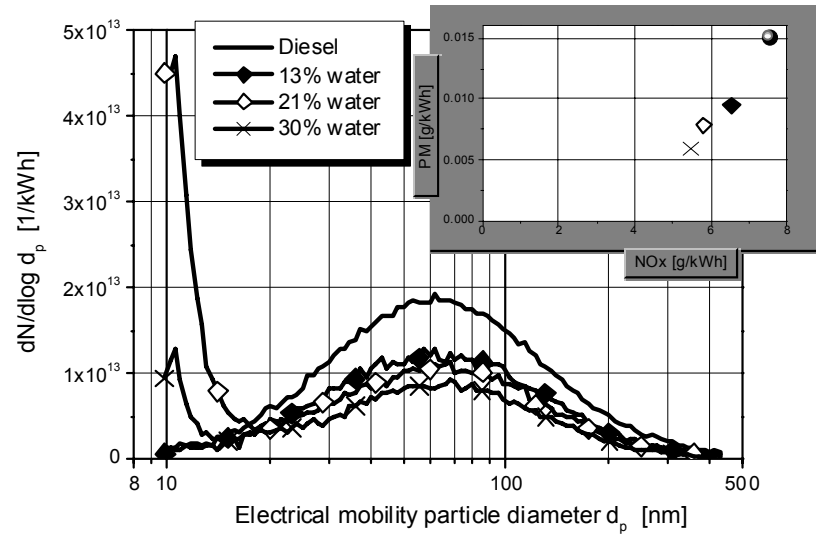


Abbildung 3: Partikelgrößenverteilung (mit Thermodesorber) und Tradeoff NOx-Partikelemissionen; Kraftstoffvariation. Betriebsbedingung 1250 U/Min, 75% Last, **Einspritzdruck konstant** (1400 bar), Einspritzbeginn konstant (3° nach OTP), Dieselmotorkraftstoff.

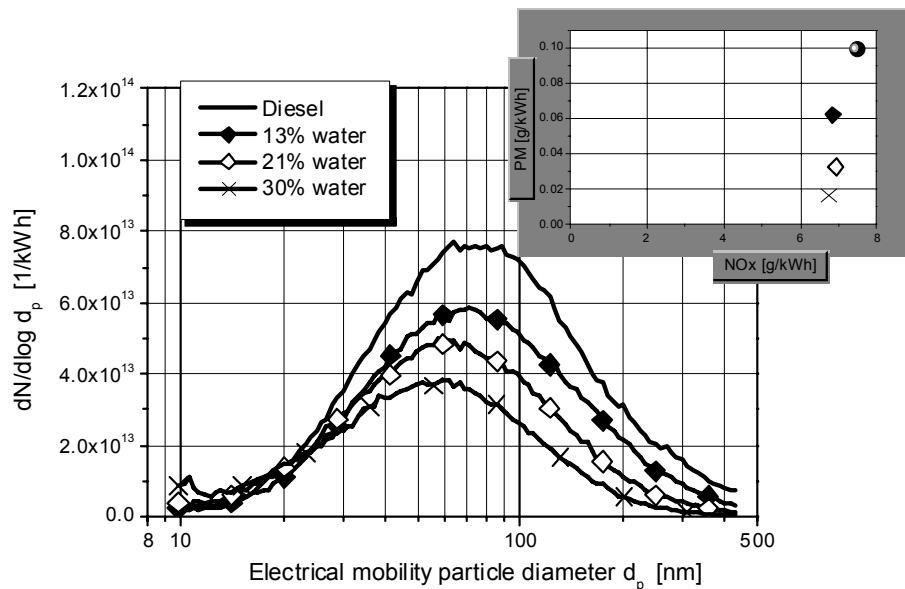


Abbildung 4: Partikelgrößenverteilung (mit Thermodesorber) und Tradeoff NOx-Partikelemissionen; Kraftstoffvariation. Betriebsbedingung 1250 U/Min, 75% Last, **Einspritzdauer konstant** (2900 μs), Einspritzdruck (800-1000 bar), Einspritzbeginn konstant (7° vor OTP), Dieselmotorkraftstoff.

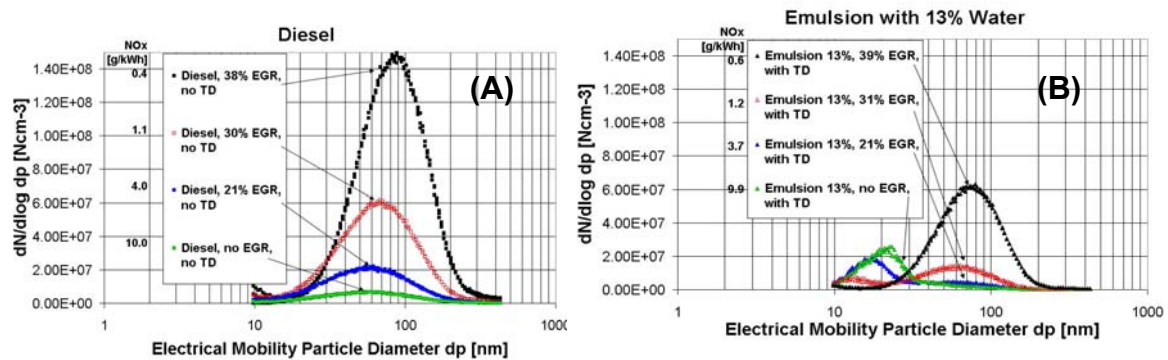


Abbildung 5: Partikelgrößenverteilung für zwei Kraftstoffe (ohne Thermodesorber für Diesel, mit Thermodesorber für die 13% Wasser-Emulsion). Betriebsbedingung 1250 U/Min, 25% Last, Einspritzbeginn konstant (4° vor OTP), Einspritzdauer konstant ($1300 \mu\text{s}$). (A) Dieselkraftstoff, Einspritzdruck 1100 bar; (B) 13% Wasser-Diesel Emulsion, Einspritzdruck 1200 bar.

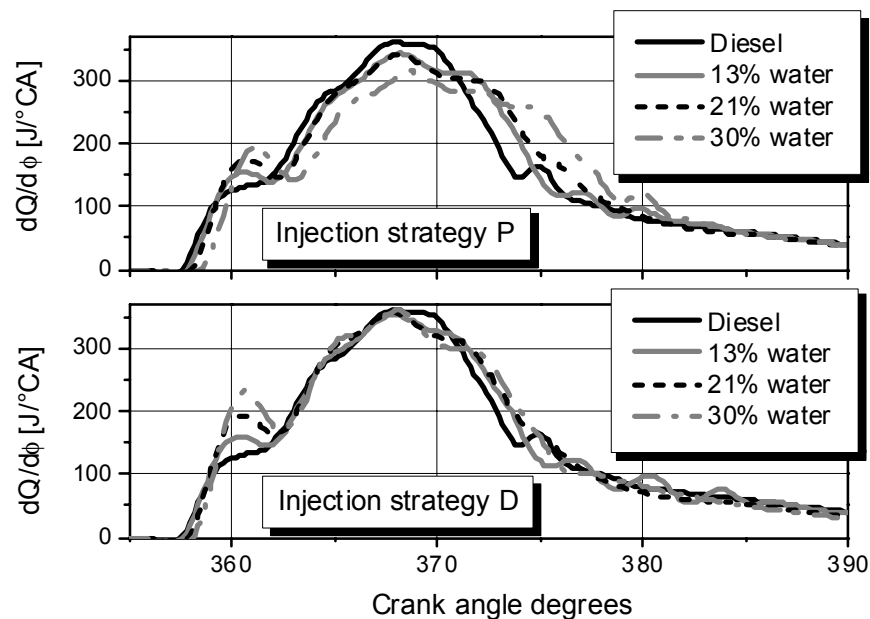


Abbildung 6: Brennverläufe bei Variation des Kraftstoffes. Betriebsbedingung 1250 U/Min, 75% Last, Einspritzbeginn 4° KW vor OTP., Einspritzstrategie **P**: **Konstanter Einspritzdruck** (1400 bar); Einspritzstrategie **D**: **Konstante Einspritzdauer** ($2100 \mu\text{s}$, Einspritzdruck 1400-1640 bar)

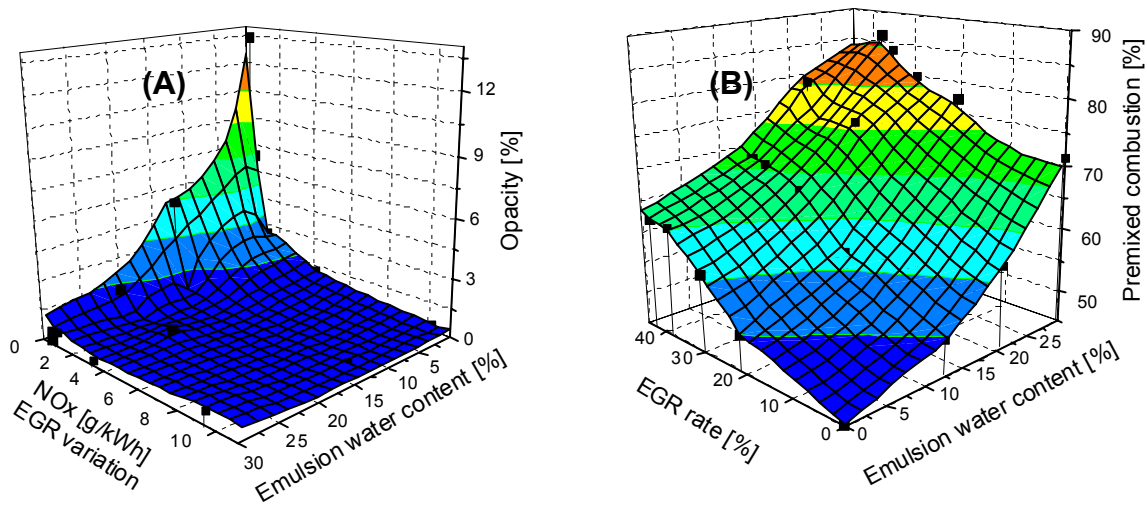


Abbildung 7: **(A)** Partikelemissionen in Abhängigkeit von Wasseranteil im Kraftstoff und NO_x bei Variation von AGR-Rate. **(B)** Vormischanteil aus Brennverlaufsanalyse in Abhängigkeit von Wasseranteil im Kraftstoff und AGR-Rate. Betriebsbedingung 1250 U/Min, 25% Last, Einspritzbeginn konstant (4° vor OTP), Einspritzdauer konstant (1300 μ s, Einspritzdruck 1100 – 1360 bar).

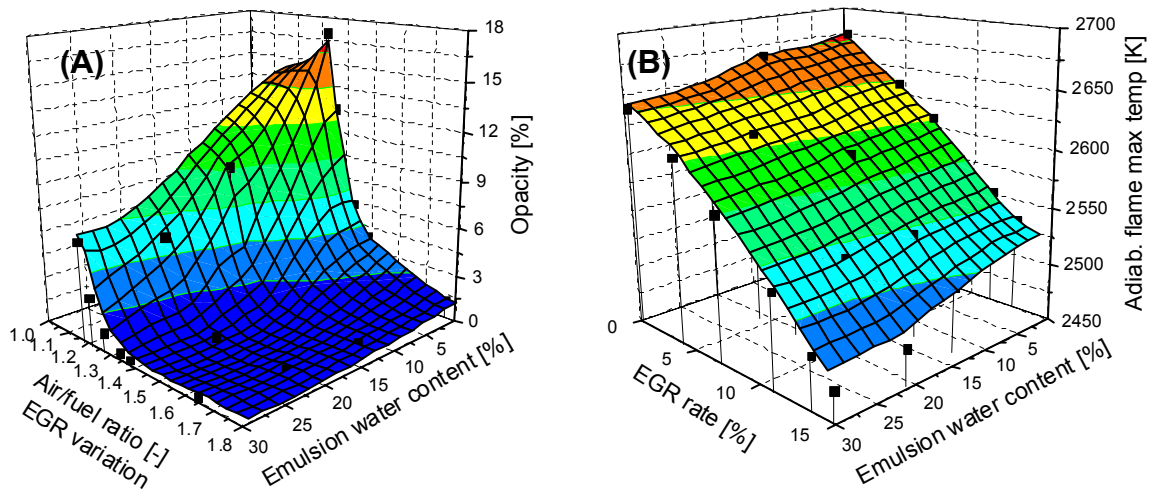


Abbildung 8: **(A)** Partikelemissionen in Abhängigkeit von Wasseranteil im Kraftstoff und NO_x bei Variation von AGR-Rate. **(B)** Maximale adiabate Flammtemperatur aus Brennverlaufsanalyse in Abhängigkeit von Wasseranteil im Kraftstoff und AGR-Rate. Betriebsbedingung 1250 U/Min, 50% Last, Einspritzbeginn konstant (4° vor OTP), Einspritzdauer konstant (1850 μ s, Einspritzdruck 1100 – 1420 bar).

ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE IM ESC-TESTZYKLUS

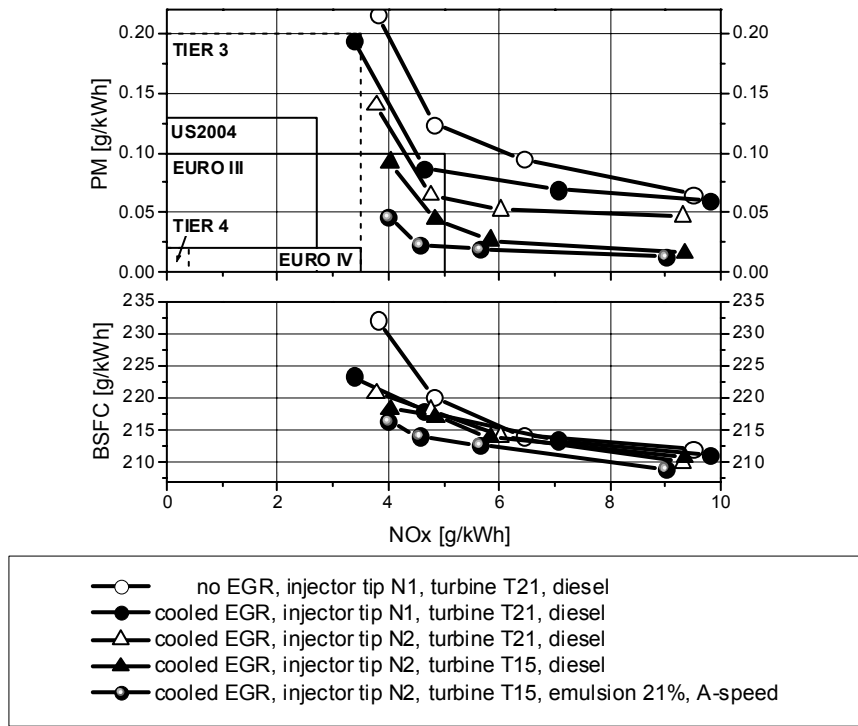


Abbildung 9: Tradeoffs NOx-Partikelemissionen und NOx-Kraftstoffverbrauch. Die Werte resultieren aus der Gewichtung von 12 Prüfungspunkten im ESC-Testzyklus (Leerlaufbedingung ist hier nicht berücksichtigt). Die Variationen entlang der Kurven wurden mit unterschiedlicher Einspritzstrategien bzw. AGR-Anteile realisiert. Injektor-Düsenstippen (Injector tips): N1: 6-Lochdüse 0.21; mm, N2: 8-Lochdüse 0.200 mm. Turbinengehäuse (turbine): T21: Halsquerschnitt 21 cm²; T15: Halsquerschnitt 15 cm².

Abbildung 9 fasst den im ESC-Testzyklus erreichten Ergebnissen über Emissionen und spezifischen Kraftstoffverbrauch zusammen. Die Kurve ohne AGR stellt Variationen von Einspritzdruck und Phasenlage der Einspritzung dar, dies war der Ausgangspunkt der bestehenden Untersuchung. Die Anpassung von Anzahl und Durchmesser der Spritzlöcher der Injektoren, sowie die Einführung gekühlter Abgasrückführung erlaubten NOx und Partikelemissionen deutlich zu reduzieren. Durch Optimierung der Turbinengröße, um einerseits den Abfall des Kraftstoff/Luftverhältnisses mit steigender AGR-Rate zu reduzieren, und andererseits bei hohen Motorlasten ohne AGR die Luftmasse im Zylinder zu erhöhen, konnten die Partikelemissionen weiter reduziert werden.

Wasser-Diesel Emulsionen bieten die Möglichkeit das NOx-Partikel Tradeoff zu brechen und geben somit mehr Flexibilität um tiefste Abgasemissionen zu erreichen. Da in diesem Konzept Stickoxide durch AGR vermindert werden, und Wasser-Diesel Emulsionen die Kontrolle der Partikelemissionen auch bei limitierenden Luftzahlen ermöglichen, wurden tiefste Partikelwerte bei niedrigen NOx durch Kombination dieser beiden Technologien erreicht. Der spezifische Kraftstoffverbrauch (Energie-Äquivalent) wird dabei durch diese Strategie nicht verschlechtert (Abbildung 9, unten).

KOMBINATION VON INNER- UND AUSSERMOTORISCHEN MASSNAHMEN

Mit Hilfe von Prozesssimulationen (thermodynamisches Simulationswerkzeug GT-Power) konnten unterschiedliche Abgasrückführungskonfigurationen am selben Motor untersucht und optimiert werden (intern ungekühlt, extern hochdruckseitig gekühlt, extern niederdruckseitig gekühlt). Betreffend Kraftstoffverbrauch und erreichbarer maximaler Rückföhrraten im Motorkennfeld ist die externe niederdruckseitige geköhlte AGR den anderen beiden Konzepten deutlich überlegen. Diese AGR Variante könnte zudem durchaus in Zukunft, beispielsweise durch den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen, an Bedeutung gewinnen. Die Abgasnachbehandlung und die externe niederdruckseitige AGR sind komplementär da niederdruckseitige Abgasrückführung erst mit dem Einsatz eines Partikelfilters praktisch realisiert werden kann (um den Verdichter zu schützen), und andererseits bei niedrigen Lasten (ungünstige Temperaturfenster für NO_x-Verminderung durch Abgasnachbehandlung, Abbildung 11) grosse Mengen AGR einfach zu handhaben sind. Die homogene Dieselverbrennung ist ein interessantes Verbrennungskonzept um die Abgasnachbehandlung im Bereich niedriger Motorlasten zu ergänzen (Abbildung 11).

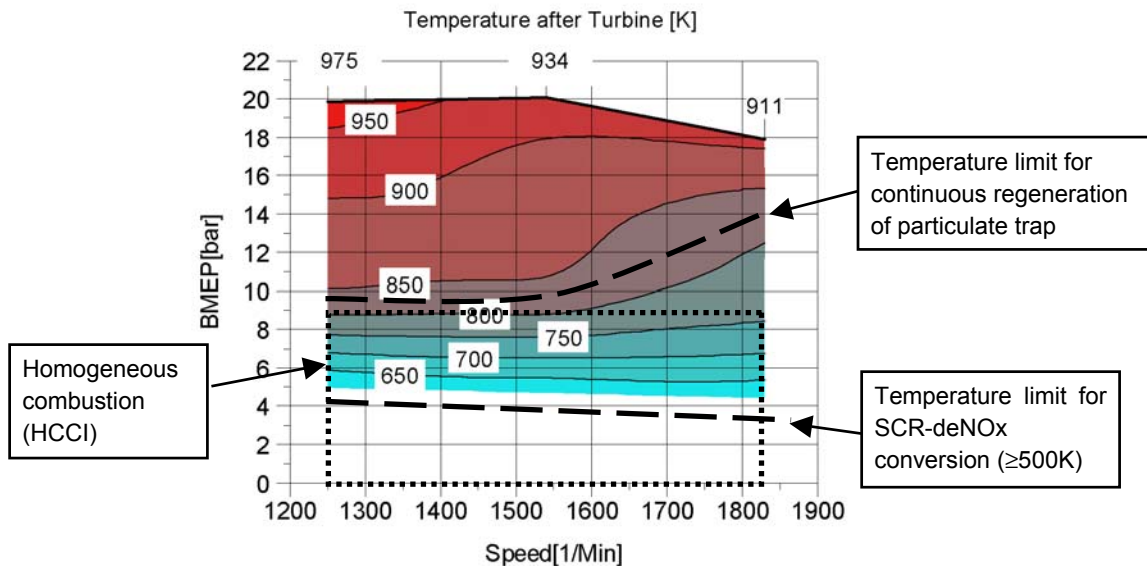


Abbildung 11: Gemessene Abgastemperaturen nach Turbine im Kennfeld (Vierzylindermotor); Bereiche für homogene Dieselverbrennung und Abgasnachbehandlung.

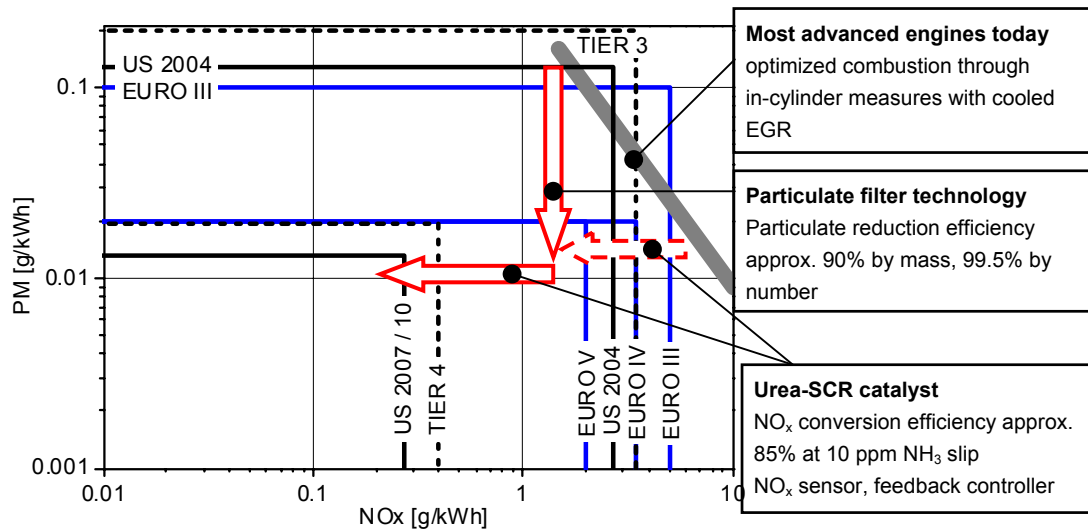


Abbildung 12: Zukünftige Emissionsgrenzwerte für Nutzfahrzeugdieselmotoren (on-highway & off-road); Potential von innermotorischen Massnahmen und Abgasnachbehandlung

Abbildung 12 (Doppel-logarithmische Skala) zeigt mögliche Emissionsmindernde Massnahmen durch Abgasnachbehandlung für Nutzfahrzeugdieselmotoren. Es ist ersichtlich, dass die aussermotorische Reduktion mindestens einer Abgaskomponente notwendig sein wird um zukünftige (EURO-IV, Tier 4, US 2007/10) Emissionsgrenzwerte zu erfüllen. Die innermotorische Emissionsreduktion stellt dabei weiterhin einen entscheidenden Optimierungsschritt dar.

Nationale und Internationale Zusammenarbeit

Alle gezeigten Resultate sind in enger 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.

Die Firma Lubrizol Ltd. (Lubrizol Deutschland GmbH, Performance Technologies Group / Lubrizol Limited, Derby GB), welche uns die Wasser-Diesel Emulsionen zur Verfügung gestellt hat, profitiert ebenfalls von den Ergebnissen mit diesen Kraftstoffen.

Bewertung 2003 und Ausblick

Die Messungen am Vierzylindermotor bestätigen das Potential der Emissionsmindernden Massnahmen (Kombination von Hochdruckeinspritzung (Common Rail) und gekühlter Abgasrückführung), die bereits am Einzylinder-Prüfstand erfolgreich appliziert und untersucht wurden [5], [6], [7], [8], [9], [10].

Bei Teillast wurden Emissionswerte unter EURO-IV durch Optimierung von Abgasrückführung und Einspritzparameter nachgewiesen. Weitere Emissionsmindernde Massnahmen wie die Erhöhung des Luftverhältnisses durch die Verkleinerung des Abgasturboladers ermöglichten eine Reduktion der Partikelemissionen bei höheren Motorlasten. Der Einsatz von Diesel-Wasser-Emulsionen trug zur weiteren Senkung von Partikel und NO_x bei. Sehr erfolgreich zur gleichzeitigen Kontrolle von NO_x und Partikel hat sich die Kombination von gekühlter Abgasrückführung und Diesel-Wasser Emulsionen erwiesen. Dabei wurden möglichst hohen Abgasrückführungsraten zur NO_x Minderung gefahren; die Verwendung von Diesel-Wasser Emulsionen und optimierte Einspritzdrücke ermöglichten die Absenkung der Partikelemissionen.

Die möglichen innermotorischen Massnahmen zur Emissionsminderung in Hinblick auf zukünftige Emissionsgrenzwerte wurden somit ausgeschöpft [1]. Die gezeigten Ergebnisse stellen eine solide Entscheidungsgrundlage für die Industrie dar.

In Zukunft wird die Zusammenarbeit mit dem Industriepartner LIEBHERR Machines Bulle S.A. weiterverfolgt. Wir arbeiten an einem Nachfolgeprojekt über Russcharakterisierung (neuen Motor mit Vierventilkopf), in diesem Projekt kooperieren wir weiter mit der EMPA (Abteilung Motoren und Feuerungen).

Referenzen

- [1] Bertola Andrea: **Technologies for Lowest NO_x and Particulate Emissions in DI-Diesel Engine Combustion - Influence of Injection Parameters, EGR and Fuel Composition**, Dissertation ETH Zürich Nr. 15373, 2003.
- [2] Bertola Andrea; Li Renxian; Boulouchos Konstantinos: **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 Paper 2003-01-3146; SAE Special Publication SP-1802, *Diesel Particulate Systems, Engines and Components, and Engine Performance Additives*, pp. 32-44, SAE 2003 Transactions – *Journal of Fuels & Lubricants*, section X, pp. XXXX-XXXX.
- [3] Bertola Andrea; Mathis Urs; Boulouchos Konstantinos; Mohr Martin: **Particulate Emissions Characterization and Combustion Analysis by using Water-Diesel Fuel Emulsions in Heavy Duty DI-Diesel Engines equipped with Common-Rail Injection System**, 7th International ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, August 2003 Zurich.
- [4] Dastoli Giuseppe: **Untersuchung des Einflusses von thermodynamischen, strömungstechnischen und reaktionskinetischen Parametern in der dieselmotorischen Verbrennung**, Diplomarbeit LAV / ETHZ März 2003.
- [5] Aufdenblatten Sandra; Schänzlin Katharina; Bertola Andrea; Mohr Martin; Przybilla Karl; Lutz Thomas: **Charakterisierung der Partikelemission von modernen Verbrennungsmotoren**, MTZ 11/2002, 2002.
- [6] Schubiger Raffael: **Untersuchungen zur Russbildung und -oxidation in der dieselmotorischen Verbrennung: Thermodynamische Kenngrößen, Verbrennungsanalyse und Mehrfarbenendoskopie**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14445, 2001.
- [7] Lutz Thomas; Bertola Andrea; Schubiger Raffael; Boulouchos Konstantinos; Nellen Christian; Schänzlin Katharina et al.: **Particulates of piston engine combustion processes**, KTI Project 4207.2 KTS, final report 2001
- [8] Bertola Andrea; Schubiger Raffael; Kasper Adelheid; Matter Ulrich; Forss Anna Maria; Mohr Martin; Boulouchos Konstantinos; Lutz Thomas: **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 2001-01-3573; SAE Special Publication SP-1715, *Diesel and Particulate Emissions*, pp. 9-21; SAE 2001 Transactions – *Journal of Fuels & Lubricants*, section 4, pp. 1925-1937.
- [9] Schubiger Raffael; Bertola Andrea: **Influence of Common-Rail Injection Parameters on Particulate Emissions of Heavy-Duty Diesel Engines**, 5th International ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, August 2001 Zurich.
- [10] Schubiger Raffael; Bertola Andrea; Boulouchos Konstantinos: **Influence of EGR on Combustion and Exhaust Emissions of Heavy Duty DI-Diesel Engines equipped with Common-Rail Injection Systems**, SAE Paper 2001-01-3497; SAE Special Publication SP-1713, *Diesel Engine Experiments*, pp. 1-10.
- [11] Bertola Andrea; Boulouchos Konstantinos: **Oxygenated Fuels for Particulate Emissions Reduction in Heavy-Duty DI-Diesel Engines with Common-Rail Fuel Injection**, SAE Paper 2000-01-2885; SAE Special Publication SP-1563, *Gasoline and Diesel Fuel Performance and Additives*, pp. 79-90; SAE 2000 Transactions – *Journal of Fuels & Lubricants*, section 4, pp. 2705-2715.