

Diss. ETH No. 20788

**DEVELOPMENT AND VALIDATION OF
A VIRTUAL SOOT SENSOR**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
Christophe Barro

MSc ETH in Mechanical Engineering
born December 22, 1982
citizen of Zurich and Carouge (GE)

accepted on the recommendation of
Prof. Konstantinos Boulouchos, examiner
Prof. Lino Guzzella, co-examiner

2012

Abstract

Because of their impact on health and environment, the pollutant emissions from diesel engines need to be further reduced. Breaking the emission trade-off between soot and NO_x is a research field of major concern in automotive diesel applications. The reduction of emission limits through legislation has led to an increased complexity of the engine control unit (ECU) calibration process as well as to expensive aftertreatment methods in order to fulfil the legislative limits. Integrating feedback of the Particulate Matter (PM) and NO_x emissions into the engine management could make fulfilment of legislation limits easier and reduce the complexity of the necessary calibration process.

Because production type PM sensors for raw emission feedback will not be available, or will be exceedingly expensive in the near future, a virtual soot sensor (VSS) has been developed. The VSS provides estimates for PM without any additional information from a direct PM measurement. For integrating the VSS in a feedback emission control loop, engine parameter influences on the soot emissions have been investigated. Detailed investigations have been carried out to evaluate the potential of post injections for soot reduction, since it is known that post injections have no significant influence on NO_x emissions. However, an accurate and general rule of how to parameterize a post injection such that it provides a maximum reduction of soot emissions does not exist. Moreover, the underlying mechanisms are not understood in detail. The experimental investigation presented here provides insight into the fundamental mechanisms of soot formation and reduction due to post injections under different turbulence and reaction kinetic conditions using a production type engine and a constant volume device with high optical access.

In parallel to the measurement of soot elementary carbon in the exhaust (using a Photo Acoustic Soot Sensor), the in-cylinder soot formation and oxidation process have been investigated with an Optical Light Probe (OLP). This sensor provides crank angle resolved information about the

in-cylinder soot evolution. In order to evaluate a post injection as a soot reduction tool for soot feedback control purposes, a detailed analysis of the effect of post injections on exhaust soot emissions as well as on the in-cylinder soot formation and oxidation has been carried out. The investigation showed that post injection application is not a feasible soot reduction tool for feedback control purposes since its optimum parameterization is difficult to find. Thus post injection application is not considered in the VSS development.

The VSS is a mean-value, zero-dimensional phenomenological model and provides predictions for the PM in real-time (cycle resolved). Its inputs are ECU variables and characteristic values of the heat release rate which are obtained in real time (i.e. within one engine cycle) from in-cylinder pressure measurement. The structure of the VSS has been derived from optical kL-measurement data, i.e. from representative, crank angle resolved evolutions of the in-cylinder PM using 3-color pyrometry. The kL-evolution has only been used in the development phase of the VSS. Once developed, the actual information of the soot trace is no longer available to the model. The model is structured into three consecutive phases which represent the in-cylinder PM evolution and is calibrated with measurements of the exhaust PM concentration of a standard engine operating map only. The three phases correspond to an initial phase of dominating formation of PM, a phase of formation and oxidation roughly in balance, and a phase of dominating oxidation. For steady state experiments, the VSS shows a very good correlation with the exhaust gas soot (respectively elementary carbon) concentration that has been measured with a photo-acoustic soot sensor (PASS). Additionally a reasonable ratio between soot formation and soot oxidation is reproduced in agreement with the kL-evolutions.

In addition, the VSS is able to predict transient PM emissions with a sufficient accuracy for control purposes. The performance of the control structure (separately developed in [1]) with integrated VSS is investigated on the New European Driving Cycle and an Urban Dynamometer Driving Schedule. Furthermore, a change in soot set point value has shown to offer the opportunity of changing the raw emission strategy on-line. These results demonstrate the potential of virtual sensors in the context of advance control strategies and offer opportunities to expand this cylinder-pressure-based approach to other pollutants (primarily NO_x) as well.

Zusammenfassung

Aufgrund ihrer Schädlichkeit für Gesundheit und Umwelt werden die erlaubten ausgestossenen Schadstoffemissionen von Dieselmotoren durch die Gesetzgebung weiter reduziert. Diese Reduktion hat dazu geführt, dass teure Abgasnachbehandlungssysteme sowie ein aufwändiger Kalibrierprozess nötig sind, um die gesetzlichen Vorschriften einhalten zu können. Eine Regelung der Russmissionen könnte diese Prozesse vereinfachen. Dies wird realisiert durch die Einbindung der Russ-Rohemissionen in das Motormanagement mittels der Regelstruktur, welche in [1] entwickelt wurde. Hierfür benötigt die Regelung geeignete Massnahmen um die Emissionen zu beeinflussen und zum anderen die aktuellen Quantitäten der Emissionen als Rückführung. Diese Arbeit hat zum Ziel, die Russmissionen eines Dieselmotors für diese Rückführung zu bestimmen.

Als Massnahmen wurden Änderungen in Drall, Nacheinspritzung wie auch in der Kombination davon untersucht. Wie die experimentellen Untersuchungen von Abgas- und In-Zylinder-Russkonzentrationen zeigen, ist die Nacheinspritzung trotz eines hohen Russreduktionspotentials nicht geeignet für eine Russregelung, da sich die Emissionen nicht monoton zu den Verstell-Parametern wie z.B. Einspritzzeitpunkt der Nacheinspritzung verhalten.

Der Fokus der Arbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung der aktuellen Russmissionen. Da in naher Zukunft für Serienapplikationen noch keine geeigneten Russensoren verfügbar, bzw. noch sehr teuer sein werden, wurde ein virtueller Russensor (VSS) entwickelt, welcher ohne unterstützende Russmessung auskommt. Mit dem VSS können die Russmissionen aufgrund von Steuergerätevariablen und mittels aus den Zylinderdruckdaten gewonnenen charakteristischen Verbrennungsgrössen, zyklus aufgelöst und on-line prognostiziert werden. Die Modellstruktur ist abgeleitet aus dem optisch gemessenen kL- resp. dem repräsentativen Russverlauf (3-Farben-Pyrometrie). Das Modell verwendet hierfür 3 sequentielle Phasen, welche den innermotorischen Russverlauf qualitativ nachbilden. Die Kalibrierung

erfolgt jedoch anhand von Abgas-Russmessungen. Die 3 Modellphasen sind dabei unterteilt in eine Bildungs-, eine Misch- und eine Oxidationsphase. Bei der Misch- bzw. Haltephase sind Russbildung und Oxidation in etwa im Gleichgewicht. Die stationäre Übereinstimmung zwischen dem virtuellen Russensors und den mit PASS (Photo-Acoustic Soot Sensor) gemessenen Abgas-Russemissionen ist sehr gut. Weiter ist der virtuelle Russensor in der Lage, die transienten Effekte auf die Russemissionen genügend genau wiederzugeben. Die erfolgreiche Integration des virtuellen Russensors in die Regelungsstruktur wird auf mehreren Fahrzyklen demonstriert. Diese Resultate zeigen das Potential von virtuellen Sensoren bezüglich erweiterter Regelstrategien und bieten die Möglichkeit, den Ansatz unter Verwendung des Zylinderdruckverlaufs auf weitere Schadstoffe (vor allem NO_x) anzuwenden.