

Modal Pollutant Emissions Model of Diesel and Gasoline Engines

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

Delia Elisabeta Ajtay
M.Sc. Mathematics
Born 11th August 1975
Nationality Romanian

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Lino Guzella, examiner
Prof. Dr. Stefan Hausberger, co-examiner
Dr. Martin Weilenmann, co-examiner

Abstract

Road traffic accounts for an important part of air pollution. For roughly 30 years, emission limits have been enforced by legislation in Europe and elsewhere. The success of the stringent regulations has been monitored by the environmental agencies. Although in the early days the interest was in the fulfillment of the legislation limits, real-world emissions represent today's main focus.

Emissions models are used to derive international, national and regional emission inventories using measurements performed in emissions laboratories and to predict the impact of different traffic related measures. These emission models connect driving behaviour and fleet data to the emission measurements from the test bench investigations.

The availability of vehicle emission models has improved significantly in the recent years. There are basically two types of emissions and fuel consumption models: one based on bag measurements and the other based on instantaneous measurements. Emission models based on bag values give results for the traffic situations similar to the one used to fill the bag. If the driving behaviour changes, new measurements with comparable driving patterns have to be performed. To account for the additional effects as load, slope or gearshift strategies, bag based models include correction functions. However, these correction functions are based on a small number of measurements with few vehicles which may not be representative for the emissions behaviour. Moreover, the combination of these correction factors (i.e. when a vehicle drives uphill with a full load) can be extremely misleading.

Instantaneous emissions modelling maps the emissions at a given time to their generating "engine state", like vehicle speed, engine speed, torque, etc. This makes it possible to integrate new, unmeasured driving patterns over the model and calculate their emission factors without further measurements. Thus, emission factors for a large number of driving situations can be determined from a small number of measurements.

Abstract

The goal of this thesis is to develop an instantaneous emissions and fuel consumption model. Such a model should be capable to predict emission factors for any unmeasured speed diagram using a limited number of measurements. Beside that, contributory aspects like load, road gradient, gearshift strategies should be also included. Such a model shall be, thus, significantly more flexible than the existing approaches and would be especially useful for the assessment of local studies (i.e. the impact of traffic management schemes, change of driving behaviour, etc).

Due to the fact that the instantaneous emission model relates at each moment of time the emission signals to their generating engine variables, the accuracy of the measurements is one of the key issues for a successful result. But, the original emission signals measured in a test are delayed to their time of formation, since the exhaust gas is transported from the engine to the analysers, and the emission peaks are flattened by convolution.

If these dynamic aspects of the exhaust transport are neglected, the emission events are correlated to the wrong second, resulting in incorrect engine status in emissions modelling. For instantaneous emissions modelling, emission values can be correlated to the correct engine state of the car only if they are at their right location on the time scale. Therefore, these delays and mixing dynamics must be compensated, i.e. the behaviour of the gas transport systems must be modelled and inverted. The modelling of the different gas transport systems is performed using linear time-varying approaches, such that emissions at their location of formation (engine-out or catalyst-out) are reconstructed from the signals recorded at the analyser.

Using the reconstructed emissions data, an instantaneous emissions model is developed for different classes of pollutants and for various categories of vehicles. The model performs reliably, emission factors from several real-world driving situations being accurately forecasted.

For the modern gasoline cars equipped with a three-way catalyst, the approach has to be extended by modelling separately the engine-out emissions and, afterwards, the catalyst-out emissions. In order to take into account the transient generation of exhaust gases, the engine-out emissions are modelled using a 4D emissions model. With the engine-out emissions as input data, a simple catalyst submodel is developed, based on the oxygen storage mechanism. The validity of the model and the parameters estimation procedure is checked by applying them to real world case studies. It is demonstrated that the model is capable of predicting the operating behaviour of the catalyst under realistic conditions and is, thus, suited for use within emissions modelling.

Zusammenfassung

Der Strassenverkehr ist eine der Hauptquellen der Luftverschmutzung. Die Emissionsgrenzen von Motorfahrzeugen wurden seit etwa 30 Jahren durch die Gesetzgebung in Europa stufenweise verschärft. Der Erfolg dieser Regulierungsschritte wurde seither durch Umweltbehörden kontrolliert. Während das Interesse früher mehr der Erfüllung der gesetzlichen Vorschriften galt, stehen heute die Ermittlung der realen Emissionen im Mittelpunkt.

Emissionsmodelle, welche auf Messungen an Rollenprüfständen basieren, werden benötigt um internationale, nationale und regionale Emissionsbestandsaufnahmen abzuleiten. Ausserdem werden diese Modelle genutzt, um den Einfluss unterschiedlicher Verkehrsparameter (z.B. Geschwindigkeitslimiten) auf die Emissionen vorhersagen zu können. In diesen Emissionsmodellen werden Daten zu Fahrverhalten und Fahrzeugbeständen mit den Emissionsmessungen von Rollenprüfstandsuntersuchungen gefaltet.

Seit den letzten Jahren stehen mehr und mehr Fahrzeugemissionsmodelle zur Verfügung. Es gibt grundsätzlich zwei Arten von Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmodellen: der eine Typ basiert auf Sackmessungen und der andere auf "online" Messungen. Emissionsmodelle, die auf Sackwerten basieren, erzeugen nur Ergebnisse für jene Verkehrssituationen, die zum Füllen der Abgassäcke genutzt wurden. Wenn sich das Fahrverhalten ändert, müssten neue Messungen mit entsprechenden Fahrmustern durchgeführt werden. Modelle, welche auf Sackmessungen beruhen, beinhalten teilweise Korrekturfunktionen, mit denen man zusätzliche Effekte wie Zuladung, Steigung und Schaltstrategie zu berücksichtigen versucht. Allerdings basieren diese Korrekturen meist auf einer geringen Anzahl Messungen mit wenigen Fahrzeugen, welche nicht repräsentativ für das Emissionsverhalten der Flotte sein könnten. Ausserdem kann die Kombination solcher einzeln ermittelter Korrekturen extrem irreführend sein. Wie soll z.B. eine Bergfahrt mit Zuladung berechnet werden, wenn Steigungsfahrten und Fahrten mit Zuladung separat gemessen wurden?

Die "online" Emissionsmodellierung bezieht die Emissionen zu einem bestimm-

Zusammenfassung

ten Zeitpunkt auf den aktuellen Motorzustand: Fahrzeuggeschwindigkeit, Motordrehzahl, Drehmoment, etc. Dies ermöglicht es, neue, nicht gemessene Fahrmuster in das Modell zu integrieren und deren Emissionsfaktoren ohne weitere Messungen zu berechnen. Dadurch können für eine grosse Anzahl von Fahr-situationen Emissionsfaktoren aus einer kleinen Anzahl von Messungen bestimmt werden.

Das Ziel dieser Doktorarbeit ist es, ein "online" Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmodell zu entwickeln. Ein solches Modell sollte geeignet sein für Einzelfahrzeuge und Fahrzeugklassen Emissionsfaktoren für jeden beliebigen, ungemessenen Geschwindigkeitsverlauf vorherzusagen. Zudem sollten Aspekte wie Ladung, Strassengefälle und Schaltsstrategien korrekt mit einbezogen werden. Ein solches Modell wird dadurch flexibler als vorhandene Ansätze und ist besonders nützlich für die Bestimmung von lokalen Studien (d.h. Einfluss von Verkehrslenkungsmaßnahmen, Änderungen in Fahrverhalten, etc.).

Aufgrund der Tatsache, dass die Emissionssignale in den "online" Modellen für jeden Zeitpunkt dem Zustand des Motors zugeordnet werden müssen, ist die zeitliche Exaktheit der Messung einer der wichtigsten Aspekte für erfolgreiche Ergebnisse. Die direkten gemessenen Emissionssignale treffen jedoch auf Grund des Transports durch das Auspuffsystem und die Messleitung verspätet im Analysator ein. Zudem werden die Emissionsereignisse durch den turbulenten Transport "verschmiert".

Wenn diese dynamischen Aspekte des Abgastransportes vernachlässigt werden, werden die Emissionsereignisse mit zeitlich verschobenen Motorzuständen korreliert. Für "online" Emissionsmodelle können Emissionswerte nur zum richtigen Motorenzustand korreliert werden, wenn sie sich auf den richtigen Zeitpunkt beziehen. Daher müssen diese Verschiebungen kompensiert werden, d. h. das Verhalten des Gastransportsystems muss modelliert und invertiert werden. Die Modellierung der unterschiedlichen Gastransportsysteme wird mit einem linearen zeit-variablen Ansatz durchgeführt, so dass die Emissionen am Ort der Entstehung (Austritt aus dem Motor oder Austritt aus dem Katalysator) aus dem vom Analysator aufgezeichneten Signal rekonstruiert werden können.

In der Folge wird aus den zeitlich korrigierten Emissionssignalen ein Emissionsmodell für verschiedene Schadstoffklassen und Fahrzeugkategorien entwickelt. Es basiert auf der Korrelation der Emissionswerte mit Drehzahl und Drehmoment des Motors. Das Modell funktioniert für gewisse Fahrzeugklassen zuverlässig: die Emissionsfaktoren werden für annähernd alle realen Fahrsituationen genau vorhergesagt.

Dieser Ansatz musste jedoch für moderne Benzinfahrzeuge, ausgestattet mit einem Drei-Wege-Katalysator, ausgeweitet werden. Die Emissionen aus dem Motor und das Verhalten des Katalysators werden separat modelliert. Die Emissionen aus dem Motor mussten mit einem vier-dimensionalen Kennfeld modelliert werden, um die transiente Abgasproduktion zu berücksichtigen. Zusätzlich zu Drehzahl und Drehmoment werden die Emissionen auf die zeitliche Ableitung des Saugrohrdrucks bezogen. Für das Verhalten des Katalysators wurde ein Teilmodell entwickelt, für welches die "engine-out" Emissionsdaten als "Inputdaten" genutzt wurden. Es basiert auf dem Sauerstoffablagungsmechanismus. Die Genauigkeit des Modells und die Parametrierung wurden überprüft, indem diese mit realen Fallstudien verglichen wurden. Es wird gezeigt, dass das Model geeignet ist, die Wirkung des Katalysators unter realistischen Bedingungen vorherzusagen und das es folglich für Emissionsmodellierungen verwendbar ist.