

Diss. ETH No. 21865

CONTRIBUTIONS TO MODEL-BASED CONTROL OF DIESEL ENGINES

A dissertation submitted to
ETH Zurich

to attain the degree of
Doctor of Sciences of ETH Zurich
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Stephan Zentner

MSc ETH in Mechanical Engineering
born on January 10, 1983
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Lino Guzzella, examiner
Prof. Dr. Rolf Johansson, co-examiner
Dr. Christoph Teetz, co-examiner

2014

Abstract

Due to their high fuel efficiency, diesel engines are used in a wide range of applications. However, they emit large amounts of harmful pollutants, such as nitrogen oxide (NO_x) and particulate matter (PM). In order to comply with increasingly stringent diesel-engine emission legislation while satisfying the customer demands for power, fuel efficiency, and comfort, the hardware used in diesel engines is becoming increasingly complex. This complexity introduces additional degrees of freedom, which create opportunities for optimization. Model-based strategies are necessary to control these degrees of freedom and to unlock the potential of complex hardware. This thesis contributes to the research field of model-based control of diesel engines by analyzing three different control problems.

In the first part of the thesis, air-path control is considered. The turbo charger(s) and the exhaust-gas recirculation (EGR) are responsible for supplying the gas mixture which is aspirated by the cylinders. Therefore they have a strong influence on the fuel consumption and the pollutant emissions. However, from a control point of view, they introduce disadvantageous plant properties, such as nonlinearities, cross-couplings and a sensitivity to disturbances. The air-path controller has to handle these problems while being applicable to a wide range of air-path configurations. A system analysis of the models of two engines of different size and air-path configuration is used to derive a generic control structure designed specifically to handle these problems. Its advantage compared to a conventional control structure is demonstrated in test bench experiments using these two engines.

In the second part of the thesis, the pollutant emissions (NO_x and PM) generated during transients are considered. During transients, the air-path controller cannot perfectly follow the reference trajectory, which can lead to the emission of significant amounts of pollutants. In order to influence these transient emissions, a model-based controller is developed, which adapts the fuel injection and the EGR during transients. It is shown

experimentally that there exists a trade-off between the transient pollutant emissions and the drivability of the engine. The proposed controller can be used to adjust this trade-off and to realize various transient operating strategies.

In the last part of the thesis, online optimal control of diesel engines is considered. The goal is to minimize the fuel consumption (i.e. the CO₂ emissions) while not exceeding an upper limit for the cumulated pollutant emissions (e.g. NO_x and PM) at the end of the cycle. In order to obtain the optimal solution, knowledge of the future operating conditions is required. However, such information is not available when carrying out an online optimization. In this thesis, a suboptimal causal approach to solve this inherently non-causal problem is proposed. A case study shows that the performance of the proposed causal approach is only marginally inferior to that of the non-causal optimal solution obtained by dynamic programming, while being applicable to online control.

Zusammenfassung

Aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads werden Dieselmotoren in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Sie stoßen aber große Mengen an Schadstoffen wie Stickstoffoxid (NO_x) und Partikel aus. Um stetig sinkende Grenzwerte für die Schadstoffemissionen einzuhalten und dem Kundenwunsch nach Leistung, Wirtschaftlichkeit und Komfort nachzukommen, wird der mechanische Aufbau von Dieselmotoren immer komplexer. Dadurch werden zusätzliche Freiheitsgrade, welche Optimierungspotenzial mit sich bringen, geschaffen. Es werden modellbasierte Regelungsstrategien benötigt, um diese Freiheitsgrade zu regeln und das Potenzial der komplexen Mechanik auszuschöpfen. Diese Arbeit trägt zum Forschungsgebiet der modellbasierten Regelung von Dieselmotoren bei, indem sie drei verschiedene Regelprobleme analysiert.

Der erste Teil der Arbeit befasst sich mit Luftpafadregelung. Die Aufgabe der Turbolader und der Abgasrückführung (AGR) ist es, das vom Zylinder angesaugte Gasgemisch bereitzustellen. Sie haben deswegen einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen des Motors. Sie bringen jedoch einige für die Regelung nachteilige Eigenschaften wie Nichtlinearität, Kreuzkopplungen und eine Empfindlichkeit auf Störungen mit sich. Der Luftpafadregler muss mit diesen Problemen umgehen können und gleichzeitig für viele verschiedene Luftpafadkonfigurationen einsetzbar sein. Aus einer Systemanalyse der Modelle von zwei verschiedenen großen Motoren mit verschiedenen Luftpafadkonfigurationen wird eine generische Reglerstruktur abgeleitet, welche gezielt mit diesen Problemen umgehen kann. Ihr Vorteil gegenüber einer gewöhnlichen Regelstruktur wird anhand dieser zwei Motoren am Prüfstand experimentell aufgezeigt.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit transienten Schadstoffemissionen (NO_x und Partikel). Während Transienten kann der Luftpafadregler dem Sollwert nicht perfekt folgen, was zum Ausstoß großer Mengen an Schadstoffen führen kann. Um diese transienten Emissionen beeinflussen zu können, wird ein modellbasierter Regler, welcher die Kraftstoffeinspritz-

zung und das AGR anpasst, entwickelt. Es wird in Experimenten gezeigt, daß ein Zielkonflikt zwischen den transienten Emissionen und der Fahrbarkeit des Motors besteht. Der hier vorgeschlagene Regler kann benutzt werden, um diesen Zielkonflikt einzustellen und verschiedene transiente Betriebsstrategien umzusetzen.

Der letzte Teil der Arbeit befasst sich mit der optimalen Regelung von Dieselmotoren in Echtzeit. Das Ziel hierbei ist die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs (bzw. der CO₂ Emissionen) unter Einhaltung eines Grenzwertes für die kumulierten Schadstoffemissionen (z.B. NO_x und Partikel) am Ende des Zyklus. Um die optimale Lösung zu ermitteln, benötigt man Informationen über die zukünftigen Betriebszustände. Bei einer Optimierung in Echtzeit sind solche Informationen jedoch nicht verfügbar. In dieser Arbeit wird ein suboptimaler kausaler Ansatz für die Lösung dieses inhärent akausalen Problems vorgeschlagen. In einer Fallstudie wird aufgezeigt, daß dieser kausale Ansatz nur geringfügig schlechtere Resultate liefert als eine akausale Optimierung mit Dynamic Programming und daß er gleichzeitig für eine Optimierung in Echtzeit geeignet ist.