

Diss. ETH No. 16490

Modeling and Control of Pressure-Wave Supercharged Engine Systems

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Peter Spring
Dipl. Masch.-Ing. ETH

born 2 June 1973
citizen of Reutigen BE

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. L. Guzzella, examiner
Prof. Dr. L. Eriksson, co-examiner
Prof. Dr. J. Piechna, co-examiner

2006

Abstract

This thesis analyzes the application of so-called pressure-wave superchargers (PWS) with spark-ignition (SI) engines. Traditionally, the torque of a gasoline engine has been controlled by throttling the intake air flow. With that method, the density of the charge and hence the mass which is aspirated by the engine is varied. While the method is cheap and has an excellent transient behavior, the efficiency of the engine decreases substantially for part-load operation. In practice, engines powering vehicles are very often operated under part-load conditions so that the resulting fuel consumption becomes high.

Many methods have been proposed to control the load without or with reduced throttling. A good way to increase the overall efficiency of an engine-vehicle system is to reduce the engine displacement and to use a supercharger. Today's standard supercharger is the turbocharger, where the enthalpy in the exhaust gas drives a compressor, which in turn raises the pressure in the intake manifold. In a pressure-wave supercharger, one-dimensional unsteady gas dynamical effects are used to transmit the enthalpy in the exhaust gas to the intake air by short-time direct contact of the fluids in narrow flow channels. Both the fast engine torque response and the high boost pressure over the entire engine speed range are reasons for favoring pressure-wave superchargers for present-day passenger-car applications.

Modern pressure-wave supercharging devices offer to arbitrarily set gas pocket valve position, cell-wheel speed, and the angle offset between air and gas casing. A multitude of cross-couplings towards the mass flows and particularly to the engine torque can be caused thereby.

During rapid transients, critical situations arise when large amounts of exhaust gas are recirculated over the charger from exhaust to intake manifolds. This causes the engine torque to drop sharply and thus severely affects the driveability of the vehicle. In order to prevent such situations, the actuators (throttles, valves, etc.) have to be controlled in a coordinated way.

Accurate models are required to simulate the steady-state and transient physical effects occurring in the charger and in the engine system.

A universally valid first-principle model is developed where a set

of Euler-type partial differential equations is numerically solved using a finite-difference method. One-dimensional unsteady gas dynamics in the cell wheel are simulated, taking into account such phenomena as leakage, heat transfer, friction, and varying actuator inputs. The validation with measurement data from a PWS-boosted engine shows an error of less than 5% in a large operating range.

A control-oriented model is then derived on the basis of that first-principle model. It is restricted to the simulation of the essential physical effects, but it saves considerable computational time. This static PWS model is implemented in a dynamic model in order to simulate the transient behavior of the entire engine system.

On the basis of these models, a new controller system is designed and experimentally verified. The controller prevents exhaust gas recirculation effects and causes the PWS to operate at optimal efficiency.

The future implementation of the control systems presented in this work will increase the acceptance of the fuel-efficient pressure-wave supercharged engines and thus help to reduce fuel consumption of passenger cars.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz von so genannten Druckwellenladern für Ottomotoren analysiert. Traditionell wird die Last von Benzinmotoren über eine Drossel im Ansaugtrakt eingestellt. So wird die Dichte im Einlasskrümmer und schliesslich der vom Motor angesaugte Massenstrom variiert. Diese Methode ist billig und weist ein vortreffliches dynamisches Verhalten auf, aber der Motorwirkungsgrad sinkt massgeblich im Teillastbetrieb. Personenwagen werden aber am häufigsten in der Teillast betrieben, was tiefe Wirkungsgrade beziehungsweise einen hohen Verbrauch bewirkt.

Zahlreiche Massnahmen sind vorgeschlagen worden, um Motoren nur teilgedrosselt oder ungedrosselt zu betreiben. Ein Konzept besteht darin, den Motor-Hubraum zu reduzieren und die Leistung über Aufladung zurück zu gewinnen. Heutzutage werden verbreitet Abgasturbolader eingesetzt, wobei die nach dem Auslasskrümmer im Rauchgas vorhandene Enthalpie dazu verwendet wird, einen Kompressor anzutreiben, welcher seinerseits die Frischluft im Einlasskrümmer verdichtet. Im Gegensatz dazu stehen in Druckwellenladern Rauchgas und Frischluft in direktem Kontakt. Die Enthalpieübertragung erfolgt durch einen gasdynamischen Prozess, wobei Druckwellen in den beiden Medien hin und her laufen. Aufgrund dieses Prinzips zeichnen sich Druckwellenlader durch ein gutes Ansprechverhalten und durch über den gesamten Betriebsbereich hohe Wirkungsgrade aus. Beides steigert die Fahrbarkeit beim Einsatz in Personenwagen.

Moderne Druckwellenladersysteme bieten die Möglichkeit, über drei unabhängige Stellglieder in den Prozess einzugreifen: Gastaschen-Zufluss-Ventil, Rotordrehzahl und Winkelversatz zwischen Luft- und Gasgehäuse lassen eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten zu, wie die Massenströme und schliesslich das Motordrehmoment zu beeinflussen sind.

Während hohen Lastsprüngen können dann kritische Situationen entstehen, wenn grosse Mengen an Rauchgas durch den Lader zurück in den Ansaugtrakt transportiert werden. Dieser Effekt, der als Abgasrezirkulation (AGR) bezeichnet wird, bewirkt einen markanten Drehmomenteinbruch und verschlechtert dadurch die Fahrbarkeit merklich. Durch eine koordinierte Betätigung der Steller sind aber solche Situationen vermeidbar.

Diese Arbeit befasst sich deshalb mit der Entwicklung von physikalischen Modellen, mit denen es möglich wird, sowohl stationäre als auch transiente Effekte von Motor und Lader simulieren zu können.

Einführend wird ein Modell vorgestellt, welches auf Grundprinzipien der Gasdynamik aufbaut. Die so genannten Eulergleichungen, ein Satz von partiellen Differentialgleichungen, werden mit Hilfe eines finite-Differenzen-Verfahrens numerisch gelöst. Das Modell berücksichtigt die eindimensionale Gasdynamik und auch Effekte wie Leckage, Wärmeübergang, Reibung und veränderliche Stellgrößen. Ein Vergleich mit Messresultaten von einem Motor mit Druckwellenlader zeigt, dass die Resultate über einen grossen Betriebsbereich innerhalb von 5% liegen.

Ausgehend von diesem finite-Differenzen-Modell wird ein vereinfachtes, regelungstechnisch orientiertes Mittelwertmodell abgeleitet. Der daraus resultierende verringerte Rechenaufwand ermöglicht den Einsatz dieses statischen Druckwellenlader-Modells in einer Simulationsumgebung, womit das dynamische Verhalten des gesamten Motorsystems nachgebildet werden kann.

Basierend auf diesen Modellen wird ein Regelkonzept entworfen und experimentell am Motor überprüft. Der Regler vermag die während Lastsprüngen auftretenden AGR-Effekte zu verhindern, und der Lader wird wirkungsgrad-optimal betrieben.

Die Implementierung der in dieser Arbeit präsentierten Regelsysteme wird die Akzeptanz von effizienten druckwellenaufgeladenen Motoren steigern und dadurch mithelfen, den Verbrauch von Personenwagen zu senken.