

Diss. ETH No. 14265

Mean Value Modeling of a Pressure Wave Supercharger Including Exhaust Gas Recirculation Effects

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Felix Weber
Dipl. Masch.-Ing. ETH
born 13. January 1970
citizen of Zürich ZH

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. L. Guzzella, examiner
Prof. Dr. M. K. Eberle, co-examiner

2001

Abstract

Naturally aspirated spark ignition (SI) engines with three-way catalytic exhaust gas aftertreatment systems inherently have a poor efficiency at part-load conditions since engine torque then is controlled by changing intake manifold pressure which causes pumping losses for the spark ignition engine. One attempt at improving this drawback has been to downsize the engine and to recover the engine power by supercharging. The small supercharged SI engine operates more efficiently in the range between lower and middle loads compared to a naturally aspirated SI engine due to the smaller pumping losses.

The pressure wave supercharger represents one possibility of supercharging a downsized SI engine. Since the exhaust gases and the fresh air are in direct contact in this charger, undesirable exhaust gas recirculation through the charger is possible. Sudden high exhaust gas recirculation causes a breakdown of the engine torque. In order to guarantee good driveability, exhaust gas recirculation must be avoided. Therefore, the target of the presented work is to investigate, to model, and to explain the effects of exhaust gas recirculation within a pressure wave supercharger.

The work presents a mean value system model of an SI engine supercharged with a pressure wave supercharger with gas pocket valve. The system model is able to predict with good accuracy states such as pressures, temperatures, mass flows, engine torque, and exhaust gas recirculation through the charger in steady-state and transient operating conditions. It explains why the scavenging process of the pressure wave supercharger during a load step must deteriorate. Model extrapolation demonstrates that a faster closing velocity of the gas pocket valve causes a worse scavenging.

The most important part of the overall system model is the model of the pressure wave supercharger. It calculates a simplified pressure wave process based on the relations of the linear one-dimensional gas dynamics neglecting the fast dynamics of the pressure wave process. It is validated by the identification of four physically motivated model

parameters. As a result, the nonmeasurable leakage losses of the pressure wave supercharger, the nonmeasurable mixing zone length, and its profile between exhaust gases and fresh air can be determined. The validated model of the pressure wave supercharger shows an error on the order of 5%.

The developed mean value system model of a pressure wave supercharged SI engine is a simulation tool. The tool may be used for system analysis, system optimization, and model based controller design in the future.

Zusammenfassung

Otto-Saugmotoren mit Drei-Wege-Katalysator zeigen in der Teillast einen schlechten Wirkungsgrad als Folge der quantitativen Füllungsregelung. Diese wird über eine Absenkung des Einlassdruckes realisiert, was zu Gaswechselverlusten für den Motor führt. Ein möglicher Ansatz, wie das Teillastverhalten von Otto-Saugmotoren verbessert werden kann, ist die Aufladung des Motors bei gleichzeitiger Hubvolumenreduktion (Downsizing), um gleiche Motorleistung zu garantieren. Im Vergleich zu Saugmotoren arbeitet ein aufgeladener Ottomotor gleicher Leistung bei kleineren bis mittleren Lasten effizienter, da im Vergleich zu einem Otto-Saugmotor weniger Gaswechselsarbeit geleistet werden muss.

Der Druckwellenlader stellt eine Möglichkeit für die Aufladung eines Verbrennungsmotors dar. Da in diesem Ladertyp die Rauchgase und die Frischluft in direktem Kontakt stehen, ist unerwünschte Abgasrezirkulation über den Lader möglich. Eine plötzliche starke Abgasrezirkulation führt zu einem Einbruch des Motordrehmoments. Will man gute Fahrbarkeit garantieren, muss Abgasrezirkulation vermieden werden. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, den Effekt der Abgasrezirkulation über den Druckwellenlader zu untersuchen, zu modellieren und zu erklären.

Die Arbeit präsentiert ein Motormodell eines mit einem Druckwellenlader mit Gastaschen-Ventil aufgeladenen Ottomotors. Das Modell sagt Zustandsvariablen wie Drücke, Temperaturen, Massenströme, Motordrehmoment und Abgasrezirkulation über den Lader mit guter Genauigkeit voraus, und zwar für stationären und instationären Motorbetrieb. Das Motormodell erklärt, weshalb die Spülung des Druckwellenladers während eines Lastsprunges schlechter werden muss. Die Modellextrapolation zeigt, dass ein schnelleres Schliessen des Gastaschen-Ventils zu einer Verschlechterung der Spülung führt.

Der zentrale Teil des gesamten Motormodells ist das Modell des Druckwellenladers. Basierend auf den Grundlagen der eindimensionalen, linearen Gasdynamik berechnet es einen vereinfachten Druck-

wellenprozess, wobei die sehr schnelle Dynamik des Druckwellenprozesses vernachlässigt wird. Das Modell ist mittels Identifikation von vier physikalisch motivierten Modellparametern validiert. Damit können die nicht messbare Leckage des Druckwellenladers, die nicht messbare Mischzonenlänge und deren Konzentrationsprofil zwischen Rauchgas und Frischluft bestimmt werden. Das validierte Druckwellenladermodell zeigt einen Fehler in der Grössenordnung von 5%.

Das hier entwickelte Motormodell eines druckwellenaufgeladenen Ottomotors ist ein Simulations-Werkzeug. Dieses Werkzeug kann in einem zukünftigen Schritt für Systemanalysen und Systemoptimierung wie auch für modellbasierte Reglerentwürfe eingesetzt werden.