

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 39

Philipp Kotman

Modeling and Control of Diesel Engine Air Systems

Schriften aus den Instituten für

Automatisierungs- und Regelungstechnik (TU Wien)
Regelungstechnik und Prozessautomatisierung (JKU Linz)

Herausgeber: Andreas Kugi und Kurt Schlacher

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 39

Philipp Kotman

**Modeling and Control
of Diesel Engine Air Systems**

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Wien, TU, Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5755-3

ISSN 1866-2242

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in großen Teilen während meiner Zeit als Doktorand in der Gruppe Regelungstechnik der zentralen Forschung der Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen, Deutschland. Die Arbeit wurde in ähnlicher Form als Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Wien eingereicht. Ich habe die Zeit als Doktorand in der Forschung der Robert Bosch GmbH und danach während der Fertigstellung dieser Arbeit als große Bereicherung empfunden und bin dankbar für die Unterstützung, die ich von vielen Menschen während dieser Zeit bekommen habe.

Allen voran gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Kugi für die ausgezeichnete fachliche Betreuung der Arbeit. In ganz besonderem Maße haben unsere intensiven Diskussionen über die theoretischen Grundlagen der flachheitsbasierten Regelung sowie der beschränkten Trajektorienplanung diese Arbeit geprägt und werden mir lehrreich in Erinnerung bleiben.

Danken möchten ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze und Herrn Associate Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kemmetmüller für die Anfertigung der Gutachten. Prof. Lunze möchte ich darüber hinaus für viele spannende Gespräche über Regelungstechnik im Allgemeinen danken. Prof. Kemmetmüller hat mir besonders zu Beginn meiner Arbeit bei der Suche nach Reglerentwurfverfahren für Systeme mit Stellgrößenbeschränkungen geholfen.

Für die Betreuung meiner Arbeit aus Sicht der Robert Bosch GmbH möchte ich Herrn Dr.-Ing. Matthias Bitzer danken, der mich stets sowohl fachlich als auch organisatorisch und mit seinem ausgezeichneten Netzwerk innerhalb der Robert Bosch GmbH unterstützt hat. Sicher wären manche Kontakte ohne ihn nicht zustande gekommen und einige Hürden in der Organisation größer gewesen.

Meinen Kollegen und Freunden Dr.-Ing. Michael Hilsch, Dr.-Ing. Michael Ungermann, Dr.-Ing. Dieter Schwarzmann und Dr.-Ing. Tobias Kreuzinger gilt mein Dank für die exzellente Arbeitsatmosphäre während meiner Zeit als Doktorand bei der Robert Bosch GmbH. Speziell Dr. Schwarzmann hat mir darüber hinaus

in zahlreichen Gesprächen den Einstieg in aufgeladene Luftsysteme erleichtert und wertvolle Einblicke in seine Erfahrung mit IMC gewährt.

Des Weiteren möchte ich meinen damaligen Vorgesetzten und Förderern bei der Robert Bosch GmbH, Herrn Dipl.-Ing. Franz Raichle und Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Schulmeister, für Ihre Unterstützung und Ermutigung danken.

Abschließend möchte ich mich herzlichst bei meiner Familie für so ungefähr alles bedanken; allen voran bei meiner Frau Friederike für ihre immerwährende Unterstützung beim Abschluss meines Dissertationsvorhabens. Einen fast ebenso großen Anteil daran, dass ich die Zeit zur Fertigstellung dieser Disseration finden konnte, haben meine Kinder Emilia und Samuel, die bereits als Babys wirklich ganz ausgezeichnet geschlafen und mir so erlaubt haben, die Nacht zum Tag zu machen. Und natürlich gilt mein Dank meinen Eltern Gerold und Irene sowie meinen Brüdern Niklas und Alexander – dafür, dass sie die Neugier in mir geweckt haben und für ihr anhaltendes Interesse an meiner Arbeit.

Stuttgart, im Dezember 2017

Philipp Kotman

Abstract

The present thesis deals with the control of one- and two-stage turbocharged Diesel engine air systems with exhaust-gas recirculation (EGR). It succeeds in solving the nonlinear multivariable control problems associated with the turbocharged air systems. The solution consists of a novel prioritizing internal model control (IMC) scheme that systematically accounts for input constraints stemming from the physical limitations of the available air system control valves.

The control design basically follows the classical design procedure: First, high-order models of the one- and two-stage air system are derived based on first principles. These full-order models (FOMs) are used as a reference for the evaluation of reduced-order models (ROMs) and controllers, and serve as a starting point for the control design. ROMs suitable for model-based control design are deduced from the FOMs by employing the singular perturbation theory, where a number of simplifying assumptions are made to render the resulting ROMs differentially flat. The flatness property of the ROMs is exploited for the design of feedforward (FF) controllers for the one- and two-stage air system. Furthermore, in order to account for input constraints, a novel constrained trajectory planning is proposed. It guarantees that the input constraints are respected and further allows for the prioritization of certain controlled variables. The prioritizing IMC scheme is finally obtained by appropriately interconnecting a flatness-based FF controller and a constrained trajectory planning. This controller guarantees to respect the input constraints and implements a user-defined prioritization of the controlled variables. Simulation studies show that an excellent closed-loop performance can be achieved for both the one- and the two-stage case.

The main contribution of this thesis is twofold: First, the state of the art in modeling and control of turbocharged air systems with EGR is advanced in several respects. Second, a novel prioritization-based constrained trajectory planning and a prioritizing IMC scheme, which explicitly take input constraints into account, are developed for static state feedback (FB) linearizable nonlinear systems.

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Modellierung, Steuerung und Regelung ein- und zwei-stufig aufgeladener Luftsysteme mit Abgasrückführung (AGR). Für beide werden die zugehörigen nichtlinearen Mehrgrößenregelungsprobleme hergeleitet und mit Hilfe eines neuen priorisierenden IMC-Ansatzes gelöst, der für die Luftsystemregelung wichtige Stellgrößenbeschränkungen berücksichtigt.

Zunächst werden hochdimensionale Luftsystemmodelle auf der Basis physikalischer Gesetze bestimmt, die in dieser Arbeit auf zwei Arten zum Einsatz kommen. Zum Einen dienen sie als Referenz für die Überprüfung vereinfachter Entwurfsmodelle und entwickelter Steuerungen und Regelungen. Zum Anderen stellen sie den Ausgangspunkt für die modellbasierte Regelung dar. Unter Verwendung der Störtheorie werden für den modellbasierten Entwurf geeignete reduzierte Modelle von den Referenzmodellen abgeleitet. Dabei sorgen vereinfachende Annahmen dafür, dass die Entwurfsmodelle differenziell flach sind. Im nächsten Schritt werden unter Ausnutzung der Flachheit der Entwurfsmodelle modellbasierte Vorsteuerungen für die Luftsysteme bestimmt. Stellgrößenbeschränkungen stellen eine wichtige Einschränkung für die modellbasierte Luftsystemregelung dar. In der vorliegenden Arbeit werden diese mit Hilfe einer neuartigen priorisierenden Trajektorienplanung berücksichtigt, welche die Einhaltung der Beschränkungen garantiert. Durch geeignete Verschaltung der Vorsteuerung und der Trajektorienplanung werden schließlich IMC-Regler für das ein- und zwei-stufige Luftsystem bestimmt. Diese Regler erweisen sich in Simulationsstudien als besonders geeignet für die Luftsystemregelung, da sie sowohl dynamisch als auch stationär eine hohe Regelgüte erreichen und gleichzeitig sicher gestellt ist, dass die Stellgrößenbeschränkungen eingehalten werden.

Diese Arbeit leistet zunächst verschiedene Beiträge zur Modellierung und Regelung aufgeladener Luftsysteme mit AGR. Darüber hinaus werden mit der beschränkten Trajektorienplanung und dem priorisierenden IMC-Regler zwei neue Entwurfsverfahren vorgestellt, die Stellgrößenbeschränkungen berücksichtigen.

Contents

Table of Contents	vii
List of Figures	xi
List of Acronyms	xv
Notation & List of Symbols	xvii
1 Introduction	1
1.1 Working Principle of Turbocharged Air Systems with EGR	2
1.2 Control Problems Related to Turbocharged Air Systems with EGR	4
1.3 State of the Art	6
1.4 Contribution of the Thesis	7
1.5 Outline of the Thesis	8
2 Physical Modeling	9
2.1 Modular Modeling Concept	10
2.2 Basic Assumptions	10
2.3 Generic Air System Component Models	11
2.3.1 Plenum Chambers	11
2.3.2 Turbocharger Shafts	13
2.3.3 Diesel Engine	13
2.3.4 Coolers	14
2.3.5 Orifice-Like Elements	14
2.3.6 EGR rate	16
2.4 High-Order Reference Air System Models	16
2.4.1 Full-Order Model of the One-Stage Air System	17
2.4.2 Full-Order Model of the Two-Stage Air System	18

2.4.3	Identification Results for the Two-Stage Air System	20
2.4.4	Stationary Evaluation of the Full-Order Model	23
2.4.5	Introductory Simulation Study	25
2.5	Conclusion & Remarks	29
3	Model Reduction	31
3.1	Model Reduction by Singular Perturbation	32
3.2	Air System Model Reduction	32
3.2.1	Basic Assumptions	33
3.2.2	Application of the Singular Perturbation Theory	35
3.2.3	Simplified Coupling Element Models	36
3.3	Design Model of the One-Stage Air System	37
3.3.1	Application of the Model Reduction Procedure	38
3.3.2	The Reduced-Order Model (ROM) in Detail	39
3.3.3	Identification Results for the One-Stage ROM	40
3.3.4	Stationary Evaluation of the One-Stage ROM	42
3.4	Design Model of the Two-Stage Air System	44
3.4.1	Application of the Model Reduction Procedure	44
3.4.2	The Reduced-Order Model (ROM) in Detail	46
3.4.3	Identification Results for the Two-Stage ROM	48
3.4.4	Stationary Evaluation of the Two-Stage ROM	51
3.5	Conclusion & Remarks	53
4	Inversion-Based Feedforward Control	55
4.1	Basics of Flatness-Based Feedforward Control	56
4.2	Feedforward Control of the One-Stage System	58
4.2.1	State Parametrization	58
4.2.2	Input Parametrization	59
4.2.3	Stationary Accuracy	61
4.2.4	Simulation Study	62
4.3	Feedforward Control of the Two-Stage System	67
4.3.1	State Parametrization	67
4.3.2	Input Parametrization	68
4.3.3	Stationary Accuracy	72
4.3.4	Simulation Study	73
4.4	Conclusion & Remarks	79
5	Constrained Trajectory Planning	81
5.1	Prioritization-Based Trajectory Planning	82
5.1.1	Guaranteeing Differential Equivalence	83
5.1.2	Prioritizing Controlled Outputs	85
5.1.3	Computing the Trajectory Planning Analytically	87
5.1.4	Switching Constrained Trajectory Planning	93

5.2	Trajectory Planning for the One-Stage Case	95
5.2.1	Design and Implementation	95
5.2.2	Visualization of the Target System Limitation	98
5.2.3	Stationary Accuracy	100
5.2.4	Simulation Study	101
5.3	Trajectory Planning for the Two-Stage Case	107
5.3.1	Design and Implementation	108
5.3.2	Visualization of the Target System Limitation	111
5.3.3	Stationary Accuracy	113
5.3.4	Simulation Study	115
5.4	Conclusion & Remarks	121
6	Internal Model Control	123
6.1	Prioritizing Internal Model Control	124
6.1.1	A Model Following View on Internal Model Control	124
6.1.2	Basics of Flatness-Based Internal Model Control	126
6.1.3	Internal Model Control with Limited Target System	128
6.2	Prioritizing IMC of the One-Stage Air System	130
6.2.1	The Internal Model Controller in Detail	130
6.2.2	Stationary Accuracy	131
6.2.3	Simulation Study	132
6.3	Prioritizing IMC of the Two-Stage Air System	136
6.3.1	The Internal Model Controller in Detail	136
6.3.2	Stationary Accuracy	137
6.3.3	Simulation Study	138
6.4	Conclusion & Remarks	142
7	Conclusions & Outlook	143
7.1	Conclusions	144
7.2	Outlook	146
A	Mathematical Appendix	147
A.1	Solving Quartic Equations Analytically	147
B	Parameters	149
B.1	Setpoints for One-Stage Air System Control	149
B.2	Setpoints for Two-Stage Air System Control	150
B.3	Parameters of the One-Stage Reduced-Order Model	152
B.4	Parameters of the Two-Stage Reduced-Order Model	152
	Bibliography	155