

BEITRAG ZUR
MODELLBASIERTEN LADEDRUCKREGELUNG
FÜR PKW-DIESELMOTOREN

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing. Michael Schollmeyer
geboren am 24. April 1980 in Hannover

2010

- 1. Referent: Prof. Dr.-Ing. W. Gerth
- 2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H. Tschöke
- Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. H. Garbe

Tag der Promotion: 08. Juli 2010

Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik

Michael Schollmeyer

**Beitrag zur modellbasierten Ladedruckregelung
für Pkw-Dieselmotoren**

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9336-9

ISSN 0945-1005

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungstechnik (IRT) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Dem Institutsleiter des IRT, Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Gerth, danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die stetige Unterstützung und die hilfreichen Gespräche besonders während der kritischen Phasen meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H. Tschöke gilt mein Dank für sein Interesse an meiner Arbeit und die Bereitschaft, das Korreferat zu übernehmen. Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Garbe danke ich für die freundliche Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Den Rahmen für diese Arbeit bildete ein Industrieprojekt, das von der IAV GmbH finanziert wurde. Ich möchte mich daher bei Herrn Dipl.-Ing. W. Schultalbers und Herrn Dipl.-Ing. A. Horn für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Ermöglichung dieses Projekts bedanken. Herrn Dipl.-Ing. M. Eichhorn danke ich für die anhaltende Begleitung und unersetzbare Unterstützung, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Herrn Dr.-Ing. M. Heuck möchte ich für die konstruktive Zusammenarbeit und den vielfältigen Austausch während des Projekts danken. Den vielen anderen Kollegen danke ich für die gute Arbeitsatmosphäre, die konstruktive Zusammenarbeit und die Unterstützung beim Korrekturlesen. Namentlich möchte ich Herrn Dr.-Ing. L. Däubler, Herrn Dipl.-Ing. M. Feldt, Herrn Dr. C. Kranz sowie Herrn Dipl.-Math.techn. N. Wolff von der Sahl für die vielfältige Unterstützung danken.

Bei den Kollegen am IRT möchte ich mich für die sehr gute Zusammenarbeit, die gute Atmosphäre und die ständige Hilfsbereitschaft bedanken. Besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. T. Lilge für die fachliche und organisatorische Begleitung meiner Arbeit.

Mein Dank gilt außerdem allen Studenten, die im Rahmen ihrer Studien-, Diplom- oder Masterarbeit bzw. als wissenschaftliche Hilfskraft diese Arbeit mit voran getrieben haben.

Meinen großen Dank spreche ich meiner Frau Remke aus, die durch ihren anhaltenden Rückhalt, ihr Verständnis, ihre Geduld und Rücksichtnahme sowie ihre Unterstützung beim Korrekturlesen des Manuskripts eine große Motivation für mich war, diese Arbeit konsequent zu Ende zu bringen. Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern danken, deren Unterstützung ich mir jederzeit sicher sein durfte. Eine Familie, die hinter einem steht, bietet einen unschätzbaren Wert.

Hannover, im August 2010

Michael Schollmeyer

Kurzfassung

Die Aufladung von Verbrennungsmotoren ist eine Schlüsseltechnologie, um die Anforderungen an moderne Pkw hinsichtlich Schadstoffausstoß und Wirtschaftlichkeit zu erfüllen. Zur Aufladung werden vorrangig Abgasturbolader eingesetzt. In dieser Arbeit wird eine Regelungsstrategie vorgestellt, die in jeder Fahrsituation den für die Verbrennung notwendigen Ladedruck durch den Abgasturbolader bereitstellt. Den Kern dieser Strategie bildet eine modellbasierte, nichtlineare Vorsteuerung für Abgasturbolader, die unter Beibehaltung der notwendigen Regelgüte den Parametrierungsaufwand für einzelne Motorvarianten deutlich reduziert.

Die Modellbildung für die Abgasturbine hat zentrale Bedeutung. In dieser Arbeit wird eine einheitliche Modellbeschreibung von Turbinen mit parallelem Bypass sowie Turbinen mit variabler Turbinengeometrie hergeleitet. Der Modellansatz auf Basis eines 0-dimensionalen stationären Strömungsprozesses zeichnet sich durch eine hohe Modellgüte auch in dynamischen Fahrsituationen sowie durch seine Übertragbarkeit auf verschiedene Aufladungssysteme aus. Mit Hilfe lokal linearer Modelle gelingt es, für den Gesamtwirkungsgrad des Turboladers ein Modell mit nur zwei Eingangsgrößen zu identifizieren, das im gesamten Betriebsbereich eine hinreichende Modellgüte für die Ladedruckregelung bereitstellt.

Das Gesamt-Systemverhalten wird anhand von Beschleunigungsmessungen mit verschiedenen Fahrzeugen bewertet. Das entworfene Verfahren zeichnet sich bei einer gezielten Variation der Umgebungsbedingungen durch ein reproduzierbares Regelungsergebnis aus. Die Experimente bestätigen das Potential des modellbasierten Ansatzes, ohne eine zusätzliche Parametrierung verschiedene Umgebungsbedingungen direkt zu kompensieren.

Zur Analyse aller Eingangsgrößen der modellbasierten Vorsteuerung wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese erlaubt eine Priorisierung der Eingangsgrößen in Bezug auf die erforderliche Sensor- oder Modellunsicherheit und deckt empfindliche Signalpfade der Struktur auf. Darauf aufbauend liefert eine Stabilitätsanalyse anhand der Ortskurve des offenen Regelkreises Auslegungskriterien für die Parameter des Gesamtsystems. Die Analyse stellt die strukturelle Robustheit der entwickelten Ladedruckregelung in verschiedenen Arbeitspunkten heraus.

Stichworte: Modellbasierte Ladedruckregelung, Modellierung, Sensitivitätsanalyse, Stabilitätsanalyse, Abgasturbolader, Dieselmotor

Abstract

Supercharging of internal combustion engines is one of the key technologies to meet today's and future requirements for passenger cars concerning pollutant emissions and fuel economy. Therefore exhaust turbochargers are commonly used. This thesis presents a control strategy for an exhaust turbocharger to provide the necessary boost pressure for the combustion process. The essential part of this approach is a model-based nonlinear feedforward control for turbochargers. The prominent advantage of this control technique is a reduced parameterization effort for different engine variants while maintaining the necessary control performance.

Modelling the exhaust turbine is a crucial design step of the developed control strategy. This thesis presents a uniform model description that characterizes both turbines with bypass and turbines with variable geometry. The developed model description is based on a 0-dimensional stationary fluid flow process. It shows a high model accuracy especially in dynamic driving cycles and is suitable for modelling different turbocharging systems. The turbocharger's total efficiency is described using local linear models. This method leads to an adequate model performance in the entire operating range although it has only two input variables.

The overall system performance is tested via acceleration experiments with different cars. The developed model-based control strategy shows a high robustness in tracking performance, especially under selective variation of the environmental conditions. The experiments demonstrate the capability of this approach to compensate the variation of the environmental conditions without an additional parametrization.

To analyse all the input variables of the model-based control structure a sensitivity analysis is examined. This technique leads to a prioritization of the input variables concerning uncertainty of sensors or models. The analysis reveals structure-based critical feedback loops as well. Based on the results of the sensitivity analysis the state of stability is evaluated using the frequency response locus of the open control-loop. This technique offers tuning criteria for the parameters of the system in use. The analysis outlines the structural robustness of the developed control-structure in different operating points.

Keywords: Model-based charge control, modelling, sensitivity analysis, stability analysis, diesel engine, turbocharger

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Randbedingungen	3
2.1 Luftpfad eines aufgeladenen Dieselmotors	3
2.2 Gesetzliche Anforderungen an moderne Dieselmotoren	4
2.2.1 Emissionsgrenzwerte	5
2.2.2 Verbrauchsminimierung	6
2.3 Motoraufladung	6
2.4 Abgasturboaufladung aus motorischer Sicht	8
2.4.1 Unterstützung der Schadstoffreduktion	8
2.4.2 Ladungswechsel eines aufgeladenen Motors	9
2.4.3 Nachteile der Aufladung	10
2.5 Aufladungssysteme	11
2.5.1 Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie	11
2.5.2 Abgasturbolader mit Wastegate	13
2.5.3 Zweistufige Aufladungssysteme	13
3 Stand der Technik und Zielsetzung	16
3.1 Aufgabe der Ladedruckregelung	16
3.2 Ladedruckregelungsstrategien	19
3.2.1 Konventionelle Kennfeldstruktur	19
3.2.2 Zustandsbasierte Regelung	20
3.2.3 Physikalisch modellbasierte Regelung	22
3.2.4 Kombinierte Ladedruck- und Frischluftregelung	23
3.3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	24
4 Modellbildung	26
4.1 Voraussetzungen zur Modellbildung	26
4.1.1 Nomenklatur	26
4.1.2 Thermodynamik der Luftstrecke	27
4.2 Modellierung Abgasseite	34
4.2.1 Turbinenmodell	35
4.2.1.1 Turbine mit fester Geometrie	35
4.2.1.2 Turbine mit variabler Geometrie	40
4.2.1.3 Wastegate oder Bypassklappe parallel zur Turbine	42
4.2.2 Berechnungsmethoden für den Druck vor Turbine	44
4.2.2.1 Berücksichtigung der Turbine	45
4.2.2.2 Berücksichtigung eines Wastegates oder einer Bypassklappe	50
4.2.2.3 Berücksichtigung überkritischer Druckverhältnisse	52

4.3	Modellierung Frischluftseite	54
4.3.1	Turboladerdrehzahl	54
4.3.2	Modellierung von Druckverlusten im Luftpfad	55
4.4	Modellierung des Turboladerwirkungsgrads	57
4.4.1	Bestimmung von Verdichter- und Turbinenwirkungsgrad	57
4.4.2	Berechnung des Referenzwertes	59
4.4.3	Wahl geeigneter Eingangsgrößen für das Wirkungsgradmodell	60
4.4.4	Lokal lineares Modell	61
4.4.4.1	Modellstruktur	61
4.4.4.2	Entwurfsverfahren	62
4.4.4.3	Modifikation des Entwurfsverfahrens	63
4.4.5	Ergebnisse	65
5	Modellbasierte Ladedruckregelung	67
5.1	Vorstellung des Regelungskonzepts	67
5.2	Modellbasierte Vorsteuerung	69
5.2.1	Modellbasierte Ansteuerung einer variablen Turbinengeometrie	69
5.2.2	Modellbasierte Ansteuerung eines Turbinenbypass oder Wastegates	71
5.3	Dynamikverbesserung der Vorsteuerung	72
5.4	Experimente zur Beurteilung der Regelgüte	76
5.4.1	Untersuchungen von Teil- und Vollastfahrtsituationen	77
5.4.2	Untersuchungen während der Regeneration des Partikelfilters	79
5.4.3	Untersuchungen bei erhöhtem Druckabfall im Abgassystem	80
5.5	Integration eines linearen Reglers zur Störkompensation	83
6	Stabilitätsuntersuchung zur modellbasierten Ladedruckregelung	86
6.1	Sensitivitätsbetrachtungen	86
6.1.1	Berechnung der Sensitivität	87
6.1.2	Sensitivität der modellbasierten Ansteuerung einer VTG	90
6.1.2.1	Sensitivität bei Kovarianz entsprechend einer Beschleunigung	93
6.1.3	Sensitivität gegenüber den Modellparametern	96
6.2	Stabilitätsuntersuchungen	98
6.2.1	Prozesssimulation	99
6.2.2	Methode zur Stabilitätsbewertung	102
6.2.3	Ergebnisse und Auswertung	105
7	Zusammenfassung	110
	Literaturverzeichnis	112

Symbolverzeichnis

In dieser Arbeit gelten die folgenden Notationen: Mehrdimensionale Matrizen und Vektoren grenzen sich gegenüber skalaren Größen durch eine fett gedruckte Schreibweise ab. Vektoren werden dabei mit kleinen Buchstaben, Matrizen mit Großbuchstaben bezeichnet (z. B. Matrix \mathbf{M} und Vektor \mathbf{b}).

Selten benutzte Formelzeichen oder abweichende Bedeutungen werden ausschließlich im Text kenntlich gemacht.

Symbol	Erläuterung
--------	-------------

Skalare

A	Anregungsamplitude
A_{eff}	effektive Querschnittsfläche
c	Strömungsgeschwindigkeit
c_d	Turbinendurchflussfaktor
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_v	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
$c_{\text{Trb, is}}$	Isentrope Ausströmgeschwindigkeit aus einer Düse
D	Dämpfung, Lehr'sches Dämpfungsmaß
e	Fehler, Modellfehler
f	Anregungsfrequenz
G	Anzahl der für lokal lineares Modell zur Verfügung stehenden Messdaten
Δp	Differenzdruck
η_{Atl}	Wirkungsgrad des Abgasturboladers
$\eta_{\text{is, Trb}}$	Isentropenwirkungsgrad der Turbine
$\eta_{\text{is, Vrd}}$	Isentropenwirkungsgrad des Verdichters
η_m	mechanischer Wirkungsgrad des Turboladers
h	spezifische Enthalpie
J_{Atl}	Massenträgheitsmoment des Turboladers
k	Diskreter Zeitschritt
κ	Isentropenexponent
λ_L	Liefergrad
L	Anzahl Teilmodelle im lokal linearen Modell
m, M	Masse
\dot{m}	Massenstrom
\dot{m}_{Abg}	Abgasmassenstrom
\dot{m}_{ByP}	Massenstrom durch ein Turbinen-Bypassventil
\dot{m}_{HFM}	Frischlufmassenstrom gemessen am HFM
\dot{m}_{Vrd}	Massenstrom durch den Verdichter

Symbol	Erläuterung
\dot{m}_{Trb}	Massenstrom durch die Turbine
\dot{M}	Massenänderung in einem Volumen
ω	Kreisfrequenz
ω_0	Eigenkreisfrequenz
n	Anzahl Eingangsgrößen für das lokal lineare Modell oder für die Sensitivitätsbetrachtung
n_{Mot}	Motordrehzahl
n_{Atl}	Turboladerdrehzahl
ν	Rohrreibungszahl
ω_{Atl}	Winkelgeschwindigkeit der Turboladerwelle
p	Druck
p_{vVrd}	Druck vor Verdichter
p_{nVrd}	Druck nach Verdichter (Ladedruck)
$p_{\text{nVrd,Ist}}$	Istdruck nach Verdichter (Ladedruck)
$p_{\text{nVrd,soll}}$	Sollladedruck nach Verdichter
p_{vTrb}	Druck vor Turbine
p_{nTrb}	Druck nach Turbine
P_{Vrd}	Thermodynamische Leistung des Verdichters
P_{Trb}	Thermodynamische Leistung der Turbine
P_{mech}	Mechanische Antriebsleistung des Turboladers
Φ_i	Aktivierungsfunktion für ein lokales Teilmodell
φ	Durchflusskennzahl
Π	Druckverhältnis
Π_{Trb}	Turbinendruckverhältnis
Ψ_{max}	maximaler Durchflusswert
q	Anzahl Zufallsexperimente für die Sensitivitätsanalyse
R_s	Spezifische Gaskonstante
ρ	Dichte
r_{uc}	Turbinen-Laufzahl
r_{Vtg}	Relative Position der variablen Turbinengeometrie
S_{X_i}	Sensitivität gegenüber der Eingangsgröße x_i
σ	Standardabweichung
t	Zeit
T_{vVrd}	Temperatur vor Verdichter
T_{nVrd}	Temperatur nach Verdichter
T_{vTrb}	Temperatur vor Turbine
τ	Verschiebung
v_M	Machzahl
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
V_{Hub}	Hubvolumen des Motors
$w_{i,j}$	Koeffizienten der lokal linearen Modellstruktur
x_i	Eingangsgrößen des lokal linearen Modells oder allgemeine Eingangsgrößen für die Sensitivitätsbetrachtung
\hat{y}	Modellausgang des lokal linearen Modells

Symbol Erläuterung

Vektoren und Matrizen

I	Einheitsmatrix
K	Kovarianzmatrix
Q_i	Gewichtungsmatrix
x	Vektor von Eingangsgrößen in das lokal lineare Modell
y	Vektor von Referenzmesswerten

Indizes

$()_{\text{approx}}$	Approximation, approximierter Wert
$()_{\text{Atl}}$	Abgasturbolader
$()_{\text{Byp}}$	Bypass
$()_{\text{eff}}$	effektiv
$()_{\text{is}}$	isentrop, bei isentroper Zustandsänderung
$()_{\text{Ist}}$	Istwert einer Größe zu der auch ein Sollwert existiert
$()_{\text{Llk}}$	Ladevolumen inklusive Ladeluftkühler
$()_{\text{n}}$	nach einer Komponente, stromabwärts einer Komponente
$()_{\text{Ref}}$	Referenz, Referenzwert
$()_{\text{red}}$	reduziert, auf die örtliche Schallgeschwindigkeit bezogen
$()_{\text{Soll}}$	Sollwert
$()_{\text{trans}}$	transformiert
$()_{\text{Ttb}}$	Turbine
$()_{\text{v}}$	vor einer Komponente, stromaufwärts einer Komponente
$()_{\text{Vrd}}$	Verdichter
$()_{\text{Vtg}}$	Variable Turbinengeometrie

Operatoren

$\dot{(\cdot)}$	erste Ableitung einer Größe nach der Zeit
$\ddot{(\cdot)}$	zweite Ableitung einer Größe nach der Zeit
$\text{Cov}(\cdot, \cdot)$	Bildung der Kovarianz von zwei statistischen Größen
Cov (\cdot)	Bildung der Kovarianzmatrix
$E\{\cdot\}$	Erwartungswertbildung
$V\{\cdot\}$	Varianzbildung

Funktionen

χ	Teilmodell einer lokal linearen Modellstruktur
$f(\cdot)$	Allgemeine Abbildung
$H(A, \omega)$	Beschreibungsfunktion
Φ_{xy}	Kreuzkorrelationsfunktion
$\Psi(\cdot)$	Durchflussfunktion
$\Psi^*(\cdot)$	In Abhängigkeit von c_d transformierte Durchflussfunktion

Symbol **Erläuterung**

Statistische Größen

X_i	Verteilung der Eingangsgröße x_i
\mathbf{X}_{-i}	Statistische Verteilung bei einer Variation aller Eingangsgrößen außer x_i
Y	Verteilung der relevanten Ausgangsgröße y

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
ATL	Abgasurbolader
CO ₂	Kohlendioxid
DPF	Dieselpartikelfilter
et al.	„et alia“: und andere
HFM	Heißfilmluftmassenmesser
NO _x	Stickoxide (NO und NO ₂)
OT	Oberer Totpunkt
Pkw	Personenkraftwagen
PM	„particulate matter“: Diesel-Rußpartikel
UT	Unterer Totpunkt
VCE	Varianz des bedingten Erwartungswerts
VTG	Variable Turbinengeometrie
