



Fabian Hausberg

Adaptive und kennfeldbasierte Steuerung aktiver Motorlager



Audi-Dissertationsreihe, Band 101





Dissertation

Adaptive und kennfeldbasierte Steuerung aktiver Motorlager

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der technischen Wissenschaften
unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Plöchl
Institut für Mechanik und Mechatronik
Forschungsgruppe Fahrzeugdynamik, E325 / A1

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Fabian Hausberg
Matrikelnummer: 1128467
Cusanusstr. 27, D-85049 Ingolstadt

Wien, im Dezember 2014



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.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2014

Zugl.: (TU) Wien, Univ., Diss., 2014

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung
des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile
daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie)
zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2014

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier
aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-899-1

eISBN 978-3-7369-4899-0



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter in der Entwicklung Aggregatelagerung I/EF-35 der Audi AG in Ingolstadt im Rahmen eines Forschungsprojektes mit der Hochschule für angewandte Wissenschaften München und der Technischen Universität Wien.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Plöchl, der sehr großes Interesse an meiner Arbeit gezeigt hat und mich stets gastfreundlich bei meinen Aufenthalten in Wien empfing. Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Univ.Prof. Dr.-Ing. Markus Rupp für die Übernahme des Koreferats und die vielen wertvollen Beiträge zur theoretischen Betrachtung adaptiver Filterverfahren.

Ebenso danke ich den Herren Prof. Dr. Peter Pfeffer und Prof. Dr.-Ing. Simon Hecker von der Hochschule München, die durch ihre kontinuierliche wissenschaftliche Betreuung das Entstehen dieser Arbeit begleitet haben. Die zahlreichen fachlichen Gespräche und die Bereitstellung der Versuchseinrichtungen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Sehr dankbar bin ich dem ehemaligen Abteilungsleiter der Entwicklung Aggregatelagerung, Torsten Kolkhorst, für die Initiierung des Promotionsprojektes und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Gleichmaßen danke ich seinem Nachfolger Armin Ohletz, der mir weiterhin den nötigen Freiraum zur Fertigstellung dieser Arbeit gegeben hat. Den Kollegen der Abteilung I/EF-35 danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Mein herzlicher Dank gilt insbesondere Stefan Vollmann für die sehr gute Zusammenarbeit und seine Unterstützung in allen Belangen. Für die zahlreichen Fahrzeugumbauten danke ich Stefan Vollnhals aus der Achsenwerkstatt. Dr.-Ing. Lars Hinrichsen danke ich für den gewinnbringenden bereichsübergreifenden Austausch und die erste Durchsicht der Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Alessandro Contini, Jan Hlawatschek, Mike Kunz, Christian Scheiblegger, Rico Schimpf und allen anderen Mitarbeiter des Labors für Kraftfahrzeugtechnik der Hochschule München bedanken. Bei meinen Besuchen an der Hochschule wurde ich stets herzlich empfangen und in meinen Anliegen unterstützt.

Mein Dank gilt auch allen Studenten, die in Form von Abschlussarbeiten und Praktika Interesse an meiner Arbeit zeigten und durch ihre Ergebnisse einen wichtigen Beitrag geleistet haben.

Schließlich gilt mein größter Dank meiner Familie und meiner Frau Alexandra für ihre bedingungslose Unterstützung, ihr großes Verständnis und die vielen aufmunternden Worte in schwierigen Phasen dieser Arbeit.





Kurzfassung

Aktive Motorlager leisten einen wichtigen Beitrag zur Komfortsteigerung in Kraftfahrzeugen mit modernen, emissionsmindernden Antriebstechnologien, wie z.B. der Zylinderabschaltung. Zur Ansteuerung aktiver Motorlager sind adaptive und nicht-adaptive Steuerungen weitverbreitet. In der vorliegenden Arbeit werden die bisher getrennt behandelten Ansätze in Form von adaptiven Filtern mit selbstlernenden Rasterkennfeldern verknüpft. Durch die Kombination beider Verfahren lassen sich die Anpassungsfähigkeit adaptiver Filter und die direkte Wirkung sowie das schnelle Folgeverhalten von Kennfeldsteuerungen optimal nutzen. Des Weiteren liefert die gemeinsame Betrachtung beider Methoden eine praktikable Vorgehensweise für die Datengenerierung kennfeldbasierter Steuerungen.

Die erfolgreiche Anwendung adaptiver und kennfeldbasierter Steuerungen hängt maßgeblich von den im Fahrzeug vorliegenden Übertragungstrecken und deren Veränderungen während des Betriebes ab. Bei zu großen Variationen können adaptive Verfahren nur mit zusätzlichen stabilisierenden Maßnahmen eingesetzt werden. Die Güte kennfeldbasierter Steuerungen wird hingegen aufgrund ihrer festen Struktur unmittelbar reduziert. Im zweiten Teil dieser Arbeit werden anhand von Prüfstandsversuchen und einem analytischen Motorlagermodell die Auswirkungen der im Fahrzeug herrschenden Umgebungseinflüsse auf das Motorlagerübertragungsverhalten analysiert. Die Ergebnisse unterstreichen die besondere Bedeutung der Frequenzlage der Lageraktorresonanz für den Einsatz adaptiver und nicht-adaptiver Steuerungen. Eine Kennfeldsteuerung kann nur deutlich unterhalb der Aktoresonanzfrequenz in Bereichen geringer Streckenänderungen effektiv genutzt werden. Die adaptive Steuerung lässt sich hingegen auch innerhalb des Resonanzbereiches mit einer entwickelten Methodik zur Onlineidentifikation eines Teilfrequenzbandes zuverlässig anwenden. In der abschließenden experimentellen Gegenüberstellung beider Steuerungsverfahren zeigt die adaptive Steuerung ein überlegenes Reduktionspotenzial. Allerdings wird auch mit der einfachen, kostengünstigen Kennfeldsteuerung, trotz der Serienstreuung des betrachteten Fahrzeugkollektivs, eine deutliche, subjektiv wahrnehmbare Komfortsteigerung erzielt.





Abstract

Active engine mounts provide an effective solution to further improve the acoustic and vibrational comfort of vehicles with emission-reducing engine technologies, e.g., cylinder-on-demand. To control active engine mounts either adaptive or non-adaptive feedforward control is commonly employed. Since both approaches previously have been treated separately, this thesis proposes methods to connect them in terms of adaptive filters with self-trained grid-based look-up tables. By incorporating the two control strategies, their inherent advantages, i.e., the adaptivity of adaptive filtering and the direct impact as well as the tracking behavior of map-based feedforward control, are combined. In addition, the joint consideration of the two feedforward control structures provides a viable approach for data generation of map-based feedforward algorithms.

The successful application of adaptive and map-based feedforward control mostly depends on the controlled plant and its respective variations during vehicle operation. Large variations may degrade the performance or even destabilize adaptive feedforward algorithms. In this case stabilizing countermeasures, e.g., online system identification, are necessary. On the other hand, map-based feedforward control becomes ineffective in the presence of transfer path variations. Therefore, in the second part of this thesis, the active and passive characteristics of an active engine mount as well as their variations in a vehicle environment are investigated. The analytical and experimental results emphasize the importance of the active engine mount actuator's resonance frequency for the use of adaptive and non-adaptive feedforward control algorithms. Map-based feedforward control can only be effectively employed in frequency regions well below the actuator's resonance frequency, where only small transfer path variations occur. However, adaptive feedforward control can be operated within the resonance region due to a proposed novel online subband identification scheme. Finally, in-vehicle tests show a superior vibration cancellation of the adaptive feedforward control algorithm compared to map-based feedforward control. Nevertheless, the latter still provides a significant, subjective perceptible vibration reduction, despite the variability of the analyzed six vehicles.





Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Operatoren und Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	3
1.1.1 Systemkonfigurationen	4
1.1.2 Verfahren zur Steuerung bzw. Regelung aktiver Motorlager	6
1.2 Zusammenfassung und Zielsetzung	11
2 Grundlagen FIR-basierter adaptiver Filter	15
2.1 Konvergenz im Mittel und normierter LMS-Algorithmus	15
2.2 Adaptives Kerbfilter	17
2.3 FxLMS-Algorithmus	20
2.3.1 Komplexer schmalbandiger FxLMS-Algorithmus	22
2.3.2 Erweiterung auf Mehrgrößensysteme	25
3 Versuchsumgebung zur experimentellen Analyse	31
3.1 Aktives Motorlager	31
3.2 Versuchsfahrzeug	32
3.2.1 Zylinderabschaltung	33
3.2.2 Signalverarbeitung und Echtzeitumgebung	34
3.2.3 Sekundärstreckenidentifikation	36
3.3 Prüfstände	36
3.3.1 Hydropulsprüfmaschine	36
3.3.2 Prüfstand zur Vermessung des aktiven Übertragungsverhaltens	38
4 Verknüpfung adaptiver und kennfeldbasierter Steuerungen	39
4.1 Zusammenhang zwischen Filtergewichten und verbrennungsmotorischer Anregung . .	39
4.2 Integration adaptiver Kennfelder in adaptive Steuerungen	42
4.2.1 Steuerungsstrukturen	42
4.2.2 Rasterkennfelder und deren Online-Adaption	44
4.2.3 Maßnahmen zur Verbesserung der Kennfeldadaption	46
4.2.4 Wahl der Schrittweiten	48
4.2.5 Simulation	50
4.2.6 Fahrversuch	51
4.3 Nutzung adaptiver Filter zur Bedatung kennfeldbasierter Steuerungen	55
4.4 Zusammenfassung	58



5	Analyse des Motorlagerübertragungsverhaltens	59
5.1	Modellbildung	59
5.1.1	Elastomermodell	60
5.1.2	Motorlagermodell	61
5.1.3	Charakteristische Pol- und Nullstellen	64
5.2	Experimentelle Validierung	66
5.3	Variation des Übertragungsverhaltens bei äußeren Einflüssen	68
5.3.1	Nichtlinearität	69
5.3.2	Lagervorlast	71
5.3.3	Temperatur	73
5.3.4	Alterung	74
5.3.5	Serienstreuung	76
5.4	Zusammenfassung	77
6	Maßnahmen zur Stabilisierung der adaptiven Steuerung	79
6.1	Stabilitätsbetrachtung	79
6.2	Robuster Systementwurf	82
6.2.1	Wahl eines frequenzabhängigen <i>Leakage</i> -Faktors	83
6.2.2	Einfluss des <i>Leakage</i> -Faktors auf die erzielbare Schwingungsreduktion	84
6.3	Onlineidentifikation eines Teilfrequenzbandes	86
6.3.1	Strukturen zur Onlineidentifikation eines Teilfrequenzbandes	87
6.3.2	Identifikationssignal	90
6.3.3	Wahl der Identifikationsschrittweite und -amplitude	92
6.3.4	Fahrversuch	94
6.4	Zusammenfassung	97
7	Experimenteller Vergleich adaptiver und kennfeldbasierter Steuerungen	99
7.1	Versuchsmethodik	100
7.2	Versuchsergebnisse	101
7.2.1	Schwingungsreduktion am Referenzfahrzeug	101
7.2.2	Schwingungsreduktion im Fahrzeugkollektiv	102
7.3	Zusammenfassung	105
8	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis	109
	Anhang	125
	Lebenslauf	141



Abkürzungen, Operatoren und Formelzeichen

Abkürzungen

AEM	Active Engine Mount
ANC	Active Noise Control
CF	Crest- bzw. Scheitelfaktor
DFT	Diskrete Fourier Transformation
Er-MCSI	Error Driven Minimal Controller Synthesis with Integral Action
FBLMS	Fast-Block Least Mean Squares
FFT	Fast Fourier Transformation
FuLMS	Filtered-u Least Mean Squares
FIR	Finite Impulse Response
FxLMS	Filtered-x Least Mean Squares
GPC	Generalized Predictive Control
IIR	Infinite Impulse Response
LMS	Least Mean Squares
LPV	Linear Parameter Varying
LQG	Linear Quadratic Gaussian
MO	Motorordnung
MPC	Model Predictive Control
MRAC	Model Reference Adaptive Control
MSE	Mean Squared Error
NBMCS	Narrow-Band Minimal Controller Synthesis
NLMS	Normalized Least Mean Squares
SHARF	Simplified Hyperstable Adaptive Recursive Filter
SFX	Synchronized Filtered-x Least Mean Squares

Operatoren

*	Faltungsoperator
∇	Gradient
$\Re \{ \cdot \}$	Realteil einer komplexen Größe
$ \cdot $	Betrag eines Skalars
$\mathbf{a}^T, \mathbf{A}^T$	Transponierte eines Vektors bzw. einer Matrix
$\bar{\mathbf{a}}, \bar{\mathbf{A}}$	Konjugierte eines Vektors bzw. einer Matrix
\mathbf{A}^{-1}	Inverse einer Matrix
\mathbf{A}^H	Hermitesche einer Matrix (Transposition bei gleichzeitiger Konjugation)
$\text{Spur}(\mathbf{A})$	Spur einer Matrix, d.h. die Summe der Diagonalelemente
q^{-1}	Verzögerungsoperator $q^{-1}x(n) = x(n-1)$
$E \{ \cdot \}$	Erwartungswertoperator

Formelzeichen

Dieses Verzeichnis enthält die wichtigsten Formelzeichen und Symbole. Für die Wahl der Formelzeichen wird die folgende Konvention weitestgehend durchgängig verwendet: Kleine kursive Buchstaben bezeichnen Skalare, z.B. x , e , u . Vektoren sind durch kleine fette Buchstaben, z.B. \mathbf{x} , \mathbf{e} , \mathbf{u} , und Matrizen durch fette Großbuchstaben, z.B. \mathbf{X} , \mathbf{E} , \mathbf{U} , dargestellt. Abweichungen zu dieser Konvention treten bei Betrachtungen im Frequenzbereich auf. Dort bezeichnen große kursive Buchstaben Skalare, z.B. X , E , U , und fette Großbuchstaben, z.B. \mathbf{X} , \mathbf{E} , \mathbf{U} , Vektoren oder Matrizen.

a	Zustandsvariable des Goertzel-Algorithmus
A	(1) Fläche (2) Amplitude
A_A	Aktormembranfläche
A_B	Blähfederfläche
A_K	Fluidkanalquerschnittsfläche
A_m	Amplitude der motorischen Störung
A_p	Amplitude der Primärstrecke
A_s	Amplitude der Sekundärstrecke
\hat{A}_s	Amplitude der Sekundärstreckenschätzung
A_T	Tragfederfläche
A_w	Amplitude der Filtergewichte des adaptiven Kerbfilters
B	magnetische Flussdichte
c	(1) Federkonstante (2) Zustandsvariable des Goertzel-Algorithmus
\mathbf{c}	Vektor mit Positionen der Kennfelddatenpunkte
c_A	Aktorfederkonstante
$c_{B,1}$	Blähfederkonstante 1 (Doppel-Kelvin-Voigt-Modell)
$c_{B,2}$	Blähfederkonstante 2 (Doppel-Kelvin-Voigt-Modell)
$c_{T,1}$	Tragfederkonstante 1 (Doppel-Kelvin-Voigt-Modell)
$c_{T,2}$	Tragfederkonstante 2 (Doppel-Kelvin-Voigt-Modell)
$C_{\text{dyn}}(s)$	dynamische Steifigkeit
$C_{A,\text{dyn}}(s)$	dynamisches Übertragungsverhalten des Lageraktors
$C_{B,\text{dyn}}(s)$	dynamische Blähfedersteifigkeit
$C_{K,\text{dyn}}(s)$	dynamisches Übertragungsverhalten des Fluidkanals
$C_{T,\text{dyn}}(s)$	dynamische Tragfedersteifigkeit
d	(1) Dämpfungskonstante (2) Störsignal bzw. gewünschte Antwort des adaptiven Filters
\mathbf{d}	Vektor mit Störung bzw. gewünschter Antwort des adaptiven Filters
d_A	Aktordämpfung
$d_{B,1}$	Blähfederdämpfungskonstante 1 (Doppel-Kelvin-Voigt-Modell)
$d_{B,2}$	Blähfederdämpfungskonstante 2 (Doppel-Kelvin-Voigt-Modell)

d_K	lineare Fluidkanaldämpfung
$d_{K,quad}$	quadratische Fluidkanaldämpfung
d_m	motorische Störung
$d_{T,1}$	Tragfederdämpfungskonstante 1 (Doppel-Kelvin-Voigt-Modell)
$d_{T,2}$	Tragfederdämpfungskonstante 2 (Doppel-Kelvin-Voigt-Modell)
D	Dämpfungsmaß
e	Eulersche Zahl $e = 2,71828\dots$
e, \mathbf{e}	Fehlersignal, Fehlervektor
e_g, \mathbf{e}_g	Fehlersignal bzw. -vektor der Onlineidentifikation
e_{KF}, \mathbf{e}_{KF}	Fehlersignal bzw. -vektor der Kennfeldadaption
$\hat{\mathbf{e}}$	Schätzfehlervektor
f	(1) Kraft (2) Frequenz (3) allgemeine Funktion
f_A	Aktorkraft
f_m	motorische Anregungskraft
f_p	passive Lagerkraft
f_s	Abtastfrequenz
f_x	motorseitige Lagerkraft
f_y	karoserieseitige Lagerkraft
$H(z)$	Störübertragungsfunktion
g	Identifikationssignal
i	(1) elektrische Stromstärke (2) Index
\mathbf{I}	Einheitsmatrix
j	imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$
J	Gütefunktional
k	(1) diskreter Zeitindex (2) Index
k_M	Wandlerkonstante
K	Anzahl Aktoren
l	(1) Länge (2) Index (3) diskreter Zeitindex
l_K	Fluidkanallänge
L	(1) Filterordnung (2) elektrische Induktivität
m	(1) Masse (2) Index
m_A	Aktormasse



m_K	Kanalfluidmasse
M	Anzahl Sensoren
M_{mot}	Motormoment
n	diskreter Zeitindex
n_{mot}	Motordrehzahl
N	(1) Anzahl Messungen (Kennfeldidentifikation) (2) Blocklänge (Diskrete Fourier Transformation)
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen
p_0	Umgebungsdruck
p_i	Lagerinnendruck
\mathbf{p}	Autokorrelationsvektor
$\mathbf{p}(n)$	Impulsantwort der Primärstrecke
$P(z)$	Primärstrecke
$P_{xx}(s)$	Übertragungsverhalten des aktiven Motorlagers zwischen motorseitiger Auslenkung und motorseitig eingeleiteter Kraft
$P_{yx}(s)$	Übertragungsverhalten des aktiven Motorlagers zwischen motorseitiger Auslenkung und karosserie-seitig eingeleiteter Kraft
\mathbf{Q}	Matrix mit orthonormalen Eigenvektoren
r	Motorordnung
R	elektrischer Widerstand
\mathbf{R}	Autokorrelationsmatrix
s	Laplace-Variable $s = \delta + j\omega$
s_p	Polstelle
s_x, s_y, s_{yx}	Nullstelle
$\mathbf{s}(n)$	Impulsantwort der Sekundärstrecke $S(z)$
$\hat{\mathbf{s}}(n)$	Impulsantwort der Sekundärstreckenschätzung $\hat{S}(z)$
$S(z), \mathbf{S}(z)$	Sekundärstrecke, Sekundärstreckenmatrix
$\hat{S}(z), \hat{\mathbf{S}}(z)$	Sekundärstreckenschätzung, Matrix der Sekundärstreckenschätzungen
$S_x(s)$	Übertragungsverhalten des aktiven Motorlagers zwischen Aktorspannung und motorseitig eingeleiteter Kraft
$S_y(s)$	Übertragungsverhalten des aktiven Motorlagers zwischen Aktorspannung und karosserie-seitig eingeleiteter Kraft
t	kontinuierliche Zeit
u, \mathbf{u}	Stellsignal, Stellvektor
u', \mathbf{u}'	gefiltertes Stellsignal, gefilterter Stellvektor
u_g	Ausgang eines zur Onlineidentifikation eingesetzten adaptiven Filters
U	(1) Spannung (2) Stellsignal im Frequenzbereich
U_{opt}	optimales Stellsignal im Frequenzbereich
U_{ind}	induzierte Spannung