

Modellbasierte Optimierung dynamischer Fahrmanöver mittels Prüfständen

Vom Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Julien Pillas

aus Frankfurt am Main

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Isermann

Tag der Einreichung: 12.12.2016

Tag der mündlichen Prüfung: 31.05.2017

Darmstadt 2017

D17

Forschungsberichte Mechatronische Systeme im Maschinenbau

Julien Pillas

**Modellbasierte Optimierung dynamischer
Fahrmanöver mittels Prüfständen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5420-0

ISSN 2198-8536

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 Zeit als Doktorand im Team für automatisierte Motoroptimierung der Daimler AG. Grundlage der Arbeit sind zahlreiche Versuche mit Versuchsfahrzeugen und Prüfständen unterschiedlicher Entwicklungsprojekte. Der Versuchsumfang stellte eine besondere Herausforderung dar, erlaubte es jedoch das wesentlich Notwendige zur Optimierung dynamischer Fahrmanöver zu ermitteln. Dies ermöglichte und erforderte die intensive Zusammenarbeit mit einer Vielzahl von Kollegen. Mein Dank gebührt allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Im Besonderen danke ich meinem Doktorvater Herrn Professor Rinderknecht für seine fachlichen Anregungen, die Förderung meiner Arbeit und das Verständnis bezüglich der Rahmenbedingungen einer Promotion in einem Industrieunternehmen.

Herrn Professor Isermann danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Herrn Dr. Frank Kirschbaum danke ich für die stetige Unterstützung, die motivierenden fachlichen Diskussionen, das Einbringen seiner umfangreichen Kenntnisse und die Bestärkung zur Anfertigung dieser Arbeit.

Den Kollegen aus dem Team für automatisierte Motoroptimierung danke ich für ein großartiges Arbeitsumfeld und die bedingungslose Unterstützung bei jeglichen Problemstellungen.

Für die tatkräftige Unterstützung bei Prüfstandsversuchen, mit allen Unwägbarkeiten die neue Anwendungen mit sich bringen, bedanke ich mich bei Herrn Dr. Richard Jakobi. Bei den Masteranden und Diplomanden Jan-Christoph Goos, Klaus Lüpkes und Christoph Malonga Makosi bedanke ich mich für die wertvollen Beiträge zu dieser Arbeit.

Den Mitarbeitern des Instituts für Mechatronische Systeme der TU Darmstadt danke ich für die freundliche Aufnahme bei den Klausurtagungen und die konstruktiven Diskussionen.

Meiner Frau Kathi danke ich für die Entbehrung vieler gemeinsamer Stunden und Ihre bedingungslose Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ausgangssituation und Zielstellung	3
3	Optimierung dynamischer Fahrmanöver mittels empirischer Modellansätze	10
3.1	Formulierung der Optimierungsziele und Auswahl der Applikationsparameter . . .	13
3.2	Versuchsplanung und -durchführung	17
3.3	Objektive Analyse dynamischer Fahrmanöver durch Kennwerte	23
3.4	Identifikation empirischer Modelle	34
3.5	Optimierung der Steuergeräteparameter	47
4	Analyse von Prüfstandskonzepten auf Eignung zur Optimierung dynamischer Fahrmanöver	50
4.1	Stand der Technik - Prüfstände als Werkzeug für die Steuergeräteapplikation . . .	51
4.2	Anforderungsanalyse - Dynamisches Verhalten von Antriebssträngen im Straßenversuch	53
4.3	Kennwerte zum Vergleich des Antriebsstrangverhaltens zwischen Prüfstand und Fahrversuch	58
4.4	Untersuchung von Rollenprüfständen	65
4.5	Untersuchung von Antriebsstrangprüfständen	77
5	Optimierung von Zughochschaltungen mittels empirischer Modellansätze	97
5.1	Applikationsparameter für Zughochschaltungen	98
5.2	Auswahl und Definition von Kennwerten für Zughochschaltungen	101
5.3	Modellbildung lokaler Modelle	105
5.4	Modellbildung und Optimierung mittels globaler Modelle	111
6	Optimierung von Lastwechselmanövern mittels empirischer Modellansätze	117
6.1	Applikationsparameter für Lastwechselmanöver	117
6.2	Auswahl und Definition von Kennwerten für Lastwechselmanöver	118
6.3	Versuchsplanung und -durchführung	119
6.4	Modellbildung und Optimierung mittels globaler Modelle	121

7 Zusammenfassung	127
Literaturverzeichnis	129
A Algorithmen zur Kennwertermittlung aus Messdaten	145
A.1 Berechnung der Fahrzeuglängsbeschleunigung aus der Summe der Seitenwellenmo- mente	145
A.2 Erkennung von Lastwechseln ohne nachfolgende Rückschaltung	145
A.3 Bestimmung der Kennwerte Frequenz und Dämpfung	147
A.4 Bestimmung der Frequenz und des Lehr'schen Dämpfungsmaßes von Antriebs- strangschwingungen bei Lastwechseln, anhand der Schätzung der Koeffizienten ei- ner Übertragungsfunktion mit Verzögerung zweiter Ordnung	150
A.5 Bestimmung des Kennwertes RMS auf Basis der Motordrehzahl für Lastwechsel .	151
A.6 Bestimmung des maximalen Ruck	153
A.7 Bestimmung des Lastwechselkennwertes für den Motormomentenaufbau	153
A.8 Bandpassfilter zur Filterung der Längsbeschleunigung im komfortrelevanten Fre- quenzbereich zwischen 2 und 10 Hz	154
A.9 Kennwert RMS	155
A.10 Kennwert des Überschwingens der Beschleunigung bei Lastwechseln	155
B Sensitivitätsanalyse der ATS-Fahrzeugsimulation bei Lastwechseln	157
C Beschreibung der Applikationsparameter des Kupplungswechsels	160
D Verwendete Versuchsfahrzeuge	161
E Tabellen	162

Abkürzungsverzeichnis

ACI	Automated Calibration Interface
ATS	Antriebsstrang
BM	Belastungsmaschine
CAN	Controller Area Network
DoE	Design of Experiments
DZI	Drehzahlintegral
$DZI_{n_{Ge}}$	Drehzahlintegral auf Basis der Getriebeeingangsdrehzahl
$DZI_{n_{Ga}}$	Drehzahlintegral auf Basis der Getriebeausgangsdrehzahl
ECU	Engine Control Unit - Motorsteuergerät
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
LFP	Kennwert „Low Frequency Percentage“
LLM	Lokales Modellnetz
LOLIMOT	Local Linear Model Tree
MSE	Mean Squared Error: Mittlere quadratische Abweichung
NRMSE	Normalized Root Mean Squared Error: Normierte Wurzel der mittleren quadratischen Abweichungen
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
PKW	Personenkraftwagen
PRESS	Predicted Residual Sum of Squares: Quadratsumme der Vorhersagefehler
PSO	Partikelschwarmoptimierung
RMS	Root Mean Square Error: Wurzel der mittleren quadratischen Abweichungen
RMS_{aw}	Kennwert zur Schwingungsbewertung auf Basis der gefilterten Fahrzeuglängsbeschleunigung ($RMS \triangleq$ Root Mean Square)

$\text{RMS}_{n_{ab}}$	Kennwert zur Schwingungsbewertung auf Basis der Getriebeausgangsdrehzahl ($\text{RMS} \triangleq \text{Root Mean Square}$)
$\text{RMS}_{n_{\text{Mot}}}$	Kennwert zur Schwingungsbewertung auf Basis der Motordrehzahl ($\text{RMS} \triangleq \text{Root Mean Square}$)
RMSE	Root Mean Squared Error: Wurzel der mittleren quadratischen Abweichungen
SS_{reg}	Sum of Squares Regression: Quadratsumme der Differenzen von Vorhersagen und Mittelwert
SS_{res}	Sum of Squares Residuals: Quadratsumme der Differenzen von Messungen und Vorhersagen
SS_{tot}	Sum of Squares Total: Quadratsumme der Differenzen von Messungen und Mittelwert
TCU	Transmission Control Unit - Getriebesteuergerät
VDV	Vibration Dose Value: Kennwert zur Beurteilung des Fahrkomforts
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Symbolverzeichnis

A	Stirnfläche
$\underline{A}$	Matrix aus den Normalenvektoren zur Beschreibung von Versuchsraumbeschränkungen
$\hat{\underline{a}}$	geschätzter Parametervektor eines Polynommodells
a_{Fzg}	Fahrzeuglängsbeschleunigung
$\hat{a}_{\text{Fzg}}$	simulierte Fahrzeuglängsbeschleunigung
$a_{\text{Fzg,TP}}$	Fahrzeuglängsbeschleunigung (tiefpassgefiltert)
a_k	Polynomkoeffizient mit Index k
$\hat{a}_{\text{Fzg}}$	aus Seitenwellenmomenten errechnete, dem Fahrversuch entsprechende Fahrzeuglängsbeschleunigung
A_k	Reibfläche einer Kupplung
a_w	bandpassgefilterte Fahrzeuglängsbeschleunigung
$\tilde{a}_w$	Effektivwert der Längsbeschleunigung
$\bar{a}_w$	Arithmetischer Mittelwert der gefilterten Längsbeschleunigung
B_p	Faktor der Steifigkeit (Pacejkas Magic Formula)
b	Minimal notwendige Anzahl an Messpunkten zur Schätzung der Modellparameter eines Polynommodells
$\underline{b}$	Abstände der Schnittflächen von Versuchsraumbegrenzungen zum jeweiligen Koordinatenursprung
C_p	Formfaktor aus Pacejkas Magic Formula
C	Verstärkungsfaktor einer Übertragungsfunktion
c_{auf}	Konstante zur Berechnung der Auftriebskraft
$\underline{c}_i$	radialer Abstand zum Zentrum eines Neurons basierend auf einer radialen Basisfunktion
c_w	Luftwiderstandsbeiwert

d	Anzahl der Eingänge eines Polynommodells
d_w	Ersatzdämpfung des Antriebsstrangs
D	Lehr'sches Dämpfungsmaß
D_p	Faktor der Skalierung aus Pacejkas Magic Formula
e	Differenz zwischen Messung und Vorhersage
$\underline{e}$	Messfehler
e_i	Auftretende Störungen bei realen Messungen mit Index i
e_L	Regelabweichung der Drehzahlregelung der links verbauten Belastungsmaschine eines Antriebsstrangprüfstands
e_{mess}	Regelabweichung gemessen an einem Antriebsstrangprüfstand
e_{sim}	Regelabweichung der Simulation eines Antriebsstrangprüfstands
F	F-Wert
F_A	Antriebskraft eines Fahrzeugs
F_{Fess}	Kraft in der Fahrzeugfesselung
f_k	Regressor mit Index k
f_0	ungedämpfte Eigenfrequenz eines Antriebsstrangs in Hz
f_s	Frequenz einer Antriebsstrangschwingung ausgelöst durch Lastwechsel
F_L	Luftwiderstand
F_R	Rollwiderstand
F_{Reakt}	Reaktionskräfte eines Fahrzeugs
F_{St}	Steigungswiderstand
$F_{\text{val} \rightarrow \text{res}}$	Quotient aus MSE_{res} und MSE_{val}
F_{Wid}	Fahrwiderstände
F_x	zwischen Rad und Fahrbahn wirkende Umfangskraft
F_{xH}	zwischen Rad der Hinterachse und Fahrbahn wirkende Umfangskraft
$F_{xH,\text{max}}$	zwischen Rad der Hinterachse und Fahrbahn maximal übertragbare Kraft
$F_{xH,\text{max},\text{Straße}}$	zwischen Rad der Hinterachse und Fahrbahn wirkende maximale Umfangskraft im Fahrversuch
F_{xV}	zwischen Rad der Vorderachse und Fahrbahn wirkende Umfangskraft
F_z	Radaufstandskraft

$F_{z,\text{dyn}}$	durch Beschleunigung hervorgerufener Anteil der Radaufstandskraft
F_{zH}	Radaufstandskraft am Rad der Hinterachse
$F_{zH,\text{max}}$	maximal übertragbare Antriebskraft an den Antriebsrädern
$F_{z,\text{stat}}$	durch Gewichtskraft hervorgerufener Anteil der Radaufstandskraft
F_{zV}	Radaufstandskraft am Rad der Vorderachse
g	Gangstufe eines Getriebes
G_a	Gütemaß der Kennwerte Frequenz und Dämpfung
$G_{\text{DR}}(s)$	Übertragungsfunktion des Drehzahlregelkreises
$\underline{H}$	Hat-Matrix
h_{Fess}	Höhe des Fesselungsangriffspunktes
h_{Sp}	Höhe des Fahrzeugschwerpunkts
i	Gesamtübersetzung des Antriebsstrangs
i_{alt}	Übersetzung des eingelegten Gangs zu Beginn eines Kupplungswechsels
i_g	Gesamtübersetzung des Antriebsstrangs im Gang g
i_{neu}	Übersetzung des Zielgangs eines Kupplungswechsels
J_{max}	Maximaler Ruck: Kennwert von Lastwechseln
k_D	Regelparameter D
k_I	Regelparameter I
K_i	Komfortkennwert i
$K_{i,\text{std}}$	standardisierter Komfortkennwert Index i
$\overline{K}_i$	Arithmetischer Mittelwert eines Komfortkennwerts i
k_P	Regelparameter P
$k_{\text{Stör}}$	Faktor der Störgrößenaufschaltung
k_w	Ersatzsteifigkeit des Antriebsstrangs
k_{wg}	Ersatzsteifigkeit des Antriebsstrangs für Gang g
LLM_i	Lokales Modellnetz mit Index i
l	Radstand
lb_i	Untere Versuchsraumbeschränkung: Minimum der Variationsgröße mit Index i

l_H	Abstand zwischen Fahrzeugschwerpunkt und Hinterachse
l_V	Abstand zwischen Fahrzeugschwerpunkt und Vorderachse
m_{Fzg}	Fahrzeugmasse
M	Anzahl gewichteter Basisfunktionen eines neuronalen Netzes
M_{Ge}	Getriebeingangsmoment
M_k	Momentenanforderung mit Einkoordinierung von Nebenaggregaten
M_{Mot}	Motormoment
$M_{Motnorm}$	Motormoment (normiert)
M_{PID}	Sollmoment: Ausgangsgröße eines PID-Reglers
MSE_{res}	mittlerer quadratischer Fehler der Modellresiduen
MSE_{wh}	mittlerer quadratischer Fehler der Wiederholungspunkte
M_{Soll}	Fahrerwunschmodent: Vom Fahrer angefordertes und aus dem Fahrpedalwert errechnetes Motormoment
M_{SollGe}	Sollmoment am Getriebeeingang der Getriebesteuerung
M_{SollNa}	Momentenanforderung von Nebenaggregaten
$M_{Sollnorm}$	Fahrerwunschmodent (normiert)
M_{Stell}	Stellmoment der Belastungsmaschinen
$M_{StellL/R}$	Stellmoment der linken und rechten Belastungsmaschine
M_{SW}	Moment, welches durch die Seitenwellen übertragen wird
M_{SW_L}	Moment, welches durch die linke Seitenwelle übertragen wird
M_{SW_R}	Moment, welches durch die rechte Seitenwelle übertragen wird
M_{Ue}	Überhöhungsmoment eines Kupplungswechsels
M_{zK}	Moment, das eine zuschaltende Kupplung überträgt
n	Anzahl der Messpunkte
n_{BML}	Drehzahl der linken Belastungsmaschine eines ATS-Prüfstands
n_{BMR}	Drehzahl der rechten Belastungsmaschine eines ATS-Prüfstands
$n_{BML/R}$	Drehzahl der linken und rechten Belastungsmaschine eines ATS-Prüfstands
n_{Ga}	Getriebeausgangsdrehzahl
n_{Ge}	Getriebeeingangsdrehzahl

n_{Mot}	Motordrehzahl
$n_{\text{Mot}_{\text{BP}}}$	zwischen 2 und 10 Hz bandpassgefilterte Motordrehzahl
n_{Soll}	Solldrehzahl berechnet durch ein Fahrzeugmodell
o	Ordnung eines Polynommodells
p	Anzahl der Eingangsgrößen eines Polynommodells
PRESS	Predicted Error Sum of Squares
Q_{w}	Wärmeeintrag in eine Kupplung
R_0	Koeffizient des geschwindigkeitsunabhängigen Anteils des Rollwiderstands
R_1	Koeffizient des Rollwiderstandsanteils in Abhängigkeit der Geschwindigkeit
R_2	Koeffizient des Rollwiderstandsanteils mit Abhängigkeit der quadrierten Geschwindigkeit
R^2	Quadratisches Bestimmtheitsmaß
R^2_{adj}	Quadratisches Bestimmtheitsmaß mit Berücksichtigung der Anzahl an Messungen
R^2_{pred}	Quadratisches Bestimmtheitsmaß der Vorhersagegenauigkeit
R^2_{val}	Quadratisches Bestimmtheitsmaß für Validierungsmessungen
r_{dyn}	Dynamischer Rollradius
r_{m}	mittlerer Reibradius einer Kupplung
$\text{RMS}_{a_{\text{w}}}$	Root Mean Square Error der gefilterten Fahrzeuglängsbeschleunigung
RMS_{std}	Root Mean Square Error standardisiert
$\text{RMS}_{a_{\text{w}},\text{std}}$	Root Mean Square Error der gefilterten Fahrzeuglängsbeschleunigung standardisiert
r_{Rolle}	Radius der Rolle eines Rollenprüfstandes
r_{xy}	Pearson'scher Korrelationskoeffizient
s	Komplexer Frequenzparameter
SS_{res}	Quadratsumme der Differenzen von Messungen und Vorhersagen
SS_{tot}	Quadratsumme der Differenzen von Messungen und Mittelwert
SS_{reg}	Quadratsumme der Differenzen von Vorhersage und Mittelwert
s_{K_i}	Standardabweichung des Komfortkennwertes i
T_{BM}	Zeitkonstante Belastungsmaschinenmodell

T_d	Schwingungsdauer: Dauer einer vollen Schwingung
$T_{D\text{Filter}}$	Konstante der Filterung des Differenzierers
T_{dyn}	Kennwert des Antriebsmomentenaufbaus
T_e Filter	Konstante der Filterung des Reglereingangs
t_i	Zeitpunkt mit Index i
t_S	Kennwert der Schaltdauer
u	Modelleingang
$\underline{u}$	Modelleingangsvektor
u_i	Modelleingang bzw. Variationsgröße mit Index i
ub_i	Obere Versuchsraumbeschränkung: Maximum der Variationsgröße mit Index i
v_{Fzg}	Fahrzeuggeschwindigkeit
$\hat{v}_{\text{Fzg}}$	simulierte Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt durch numerische Integration
v_{low}	Parameter eines Reifenmodells
VDV_{a_w}	Vibration Dose Value der gefilterten Längsbeschleunigung
$\text{VDV}_{a_w,\text{std}}$	Vibration Dose Value der gefilterten Längsbeschleunigung (standardisiert)
w_i	Gewichtung mit Index i bei einem künstlich neuronalem Netz
$\underline{X}$	Designmatrix
y_i	Ausgangsgröße mit Index i
$\hat{y}_i$	prädizierter Modellausgang mit Index i
$\tilde{y}_i$	Validierungsmessung i
$\hat{\tilde{y}}_i$	Modellvorhersage der Validierungsmessung i
$\bar{y}_{\text{wh}}$	Arithmetischer Mittelwert der Wiederholpunkte
z_i	Zielgröße einer Optimierung mit Index i
z_1	Lamellenzahl einer Kupplung
α	Fahrpedalwert
α_w	Fahrpedalwert durch Fahrpedalkennlinien variiert
χ	Parametervektor eines Optimierungsproblems i
δ	Abklingkonstante

$\Delta n_{\text{Kupp,ab}}$	Differenzdrehzahl des abschaltenden Schaltelements
$\Delta n_{\text{Kupp,zu}}$	Differenzdrehzahl des zuschaltenden Schaltelements
Δ_{LR}	Losreißgradient, Kennwert für Schaltungen
ϵ	Messfehler
φ	Drehwinkel
Φ_i	Basisfunktion neuronaler Netze
$\varphi(x)$	Dichtefunktion
φ_{Mot}	Drehwinkel der Antriebsseite
φ_{Ab}	Drehwinkel der Abtriebsseite
φ_{R}	Raddrehwinkel
$\ddot{\varphi}_{\text{V}}$	rotatorische Beschleunigung der Vorderachse
γ	Erdbeschleunigung
Λ	Logarithmisches Dekrement
λ_i	Nullstelle des charakteristischen Polynoms mit dem Index i
λ_{S}	Radschlupf
λ_{Sc}	kritischer Radschlupf
μ_{e}	Erwartungswert einer Verteilung
μ	Reibungskoeffizient
μ_{g}	Gleitbeiwert
μ_{h}	Haftbeiwert
$\underline{\Omega}_i$	Parametervektor einer Basisfunktion eines künstlichen neuronalen Netzes mit Index i
ω_d	Eigenkreisfrequenz eines gedämpften Systems
ω_0	ungedämpfte Eigenkreisfrequenz eines Systems
ω_{0_g}	ungedämpfte Eigenkreisfrequenz eines Antriebsstrangs in Gang g
Φ	Basisfunktion eines künstlichen neuronalen Netzes
π	Kreiszahl
Ψ	Zielfunktion eines Optimierungsproblems
ρ_{L}	Dichte von Luft

σ	Standardabweichung
σ^2	Varianz
σ_{a_w}	Kennwert der Standardabweichung der gefilterten Beschleunigung a_w
Θ_{Ab}	rotatorisches Massenträgheitsmoment das am Abtrieb eines Antriebsstrangs wirksam ist
Θ_{ATS}	rotatorisches Massenträgheitsmoment der Belastungsmaschinen eines Antriebsstrang-Prüfstands
Θ_{Fzg}	rotatorisches Massenträgheitsmoment der Abtriebsseite des Antriebsstrangs eines Fahrzeugs
Θ_{Mot}	rotatorisches Massenträgheitsmoment der Antriebsseite eines Antriebsstrangs
Θ_{R_i}	rotatorisches Massenträgheitsmoment eines Rades mit Index i
Θ_{RH}	rotatorisches Massenträgheitsmoment der Hinterräder
Θ_{RV}	rotatorisches Massenträgheitsmoment der Vorderräder
ζ	Steigungswinkel