

Regelung und Diagnose von Fahrzeug-Antriebssträngen mit Zweimassenschwungrad

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Karlsruhe (TH)
genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Andreas Walter
aus Pfullendorf

Tag der mündl. Prüfung: 03.06.2008
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. U. Kiencke, Universität Karlsruhe (TH)
Korreferent: Prof. Dr. L. Guzzella, ETH Zürich

Berichte aus der Fahrzeugtechnik

Andreas Walter

**Regelung und Diagnose von Fahrzeug-Antriebs-
strängen mit Zweimassenschwungrad**

Shaker Verlag
Aachen 2008

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.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7607-2

ISSN 0945-0742

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 Industrielle Informationstechnik (IIIT) der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Karlsruhe (TH).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Kieneke, Leiter des Instituts für Industrielle Informationstechnik, für die Initiierung und Betreuung dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Hauptreferats. Für die Übernahme des Korreferats sowie das entgegengebrachte Interesse an dieser Arbeit möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Lino Guzzella von der ETH Zürich bedanken.

Die Arbeit entstand im Rahmen eines Industriekooperationsprojekts mit der Firma LuK GmbH & Co. oHG in Bühl. Neben den zahlreichen Mitarbeiterten mit denen ich im Laufe der Arbeit Kontakt hatte möchte ich besonders Herrn Dr. Stephen Jones, Herrn Bertrand Penne, Herrn Thomas Winkler und Herrn Roland Sebacher für ihre fachliche und organisatorische Unterstützung danken.

Ein weiterer Dank gilt meinen Kollegen für das besondere Arbeitsklima am Institut. Dabei möchte ich speziell Herrn Dr. Stephan Brummund und Herrn Dr. Benedikt Merz für die zahlreichen fachlichen, philosophischen und heiteren Gespräche danken, welche ich in Zukunft sicherlich vermissen werde. Ohne die zahlreichen Studenten, welche im Rahmen von Studien- bzw. Diplomarbeiten einen wichtigen Beitrag geleistet haben, wäre eine Arbeit in diesem Umfang nicht möglich gewesen. Auch ihnen gebührt daher ein besonderer Dank. Frau Brigitte Chroszcz und Herrn Ulrich Seiller danke ich für die sehr sorgfältige Durchsicht des Manuskripts und wertvollen Korrekturvorschläge.

Abschließend möchte ich mich bei allen Menschen in meinem persönlichen Umfeld für den Rückhalt und Unterstützung während dieses Lebensabschnittes bedanken.

Wer glaubt etwas zu sein, hat aufgehört etwas zu werden.
(Sokrates)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	2
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	4
1.3 Gliederung dieser Arbeit	4
2 Der Hubkolbenmotor	7
2.1 Grundlagen	7
2.1.1 Aufbau	7
2.1.2 Arbeitsprozess	9
2.1.3 Arbeitsprinzip	12
2.1.4 Ladungswechsel	15
2.1.5 Einspritzsysteme	18
2.1.6 Leistung und Wirkungsgrad	21
2.2 Motordynamik	24
2.2.1 Drehmomentenbilanz an der Kurbelwelle	24
2.2.2 Kinematik des Kurbeltriebes	25
2.2.3 Drehmoment des Arbeitsgases	26
2.2.4 Kompressions-/Expansionsmoment	28
2.2.5 Massenmoment	32
2.2.6 Motorreibung	37
2.3 Modellierung der Verbrennung	39
2.3.1 Mittelwertmodelle	39
2.3.2 Empirische Modelle	41
2.3.3 Thermodynamische Modellbildung	43
2.3.4 Brennverlauf	47
2.3.5 Wandwärmeverluste	51
2.3.6 Fazit	52
2.4 Modellbildung und Simulation	53
2.4.1 Modellstruktur	53
2.4.2 Systemtechnische Betrachtung	54
2.4.3 Simulationsumgebung	56
2.4.4 Simulationsergebnisse	57
2.5 Messwernerfassung	58

2.5.1	Drehzahl	59
2.5.2	Zylinderdruck	63
2.5.3	Motormoment	64
3	Das Zweimassenschwungrad	65
3.1	Entwicklungshintergrund und Motivation	65
3.2	Funktionsprinzip	68
3.2.1	Elementare Bauform	68
3.2.2	Schwingungsisolation	69
3.2.3	Bogenfedercharakteristik	74
3.2.4	Erweiterte Bauformen	82
3.3	Modellbildung und Simulation	85
3.3.1	Systemtechnische Modellierung	85
3.3.2	Modellierung der Bogenfeder	87
3.3.3	Modellierung des Innendämpfers	88
3.3.4	Modellierung der Reibsteuerscheibe	88
4	Der Antriebsstrang	91
4.1	Struktur und Systemdynamik	91
4.1.1	Topologischer Aufbau	91
4.1.2	Funktionsbeschreibung der Komponenten	93
4.2	Modellbildung	98
4.2.1	Lineares Modell	98
4.2.2	Lineares Modell reduzierter Ordnung	101
4.2.3	Parametrierung	104
4.2.4	Identifikation	106
4.2.5	Validierung	107
4.3	Kupplung	108
4.3.1	Geöffnete Kupplung	110
4.3.2	Geschlossene Kupplung	110
4.3.3	Schleifende Kupplung	111
5	Rekonstruktion des direkt indizierten Motordrehmoments	113
5.1	Lineares ZMS Modell	114
5.2	Invertierung des linearen ZMS-Modells	118
5.3	Erweiterung des Arbeitsbereichs	125
5.3.1	Lokal lineare Neuro-Fuzzy-Modelle	125
5.3.2	Parametrierung der lokalen linearen Modelle	130
5.3.3	Strukturoptimierung	135
5.3.4	Schätzung des dynamischen ZMS-Verhaltens	138
5.3.5	Schätzung des Motormoments	142
5.4	Erweiterung der lokalen Modellstruktur	144

5.4.1	Erhöhung der Ordnung des linearen Modells	144
5.4.2	Modifikation der lokalen Modellstruktur	146
5.5	Validierung	147
5.5.1	Variation diverser ZMS-Bauformen	147
5.5.2	Vergleich mit realen Messdaten	149
5.6	Langzeitadaption	155
5.6.1	Fertigungstoleranzen und Alterungseffekte des ZMS	155
5.6.2	Schätzwertkorrektur durch Torsionsnachführung	157
5.7	Diskretisierung im Zeit- und Wertebereich	159
5.7.1	Diskretisierung der lokalen linearen Modelle im Zeitbereich	159
5.7.2	Positionsalgorithmus des linearen Schätzmodells	162
5.7.3	Geschwindigkeitsalgorithmus des linearen Schätzmodells	164
5.8	Hardwareimplementierung	167
5.8.1	DSP-Hardwareumgebung	167
5.8.2	Implementierung der Gewichtungsfunktionen	170
5.8.3	Rechenzeitoptimierung durch Modelldeaktivierung	172
5.8.4	Reinitialisierung inaktiver lokal linearer Modelle	174
5.8.5	Korrektur additiver und multiplikativer Schätzfehler	174
5.8.6	Rechenzeitanalyse	176
6	Motormanagement	181
6.1	Leeraufregelung	182
6.1.1	Aufgabe der Leerlaufregelung	182
6.1.2	Konventionelle Ansätze	182
6.1.3	Subharmonische Schwingungen	185
6.1.4	Modifizierter PI-Leerlaufregler	191
6.1.5	Modellbasierte Leerlauf-Regelung im Zustandsraum	194
6.1.6	Robuste Leerlauf-Regelung	198
6.2	Zylindergleichstellung	205
6.2.1	Aufgabe der Zylindergleichstellung	205
6.2.2	Identifizierung und Quantifizierung von Zylinderfehlern	207
6.2.3	Korrektur von Zylinderfehlern	212
6.2.4	Validierung	216
6.3	Anti-Ruckel-Regelung	222
6.3.1	Drehschwingungen des Antriebsstrangs	223
6.3.2	Konventionelle Ansätze	224
6.3.3	Streckenmodelle	225
6.3.4	Ausgangsrückführung	229
6.3.5	Modellbasierte Regelung im Zustandsraum	231
6.4	Kombination unterschiedlicher Regelungskonzepte	235
6.4.1	Gewichtung der Ausgangsgrößen	236
6.4.2	Zusätzliche Verbundstrategien	238

6.5	Analyse des Verbrennungsprozesses	238
6.5.1	Erkennung von Verbrennungsaussetzern	238
6.5.2	Bewertung des Verbrennungsprozesses	244
7	Zusammenfassung	245
A	Streckenparameter	249
A.1	Motorparameter	249
A.2	Parameter des ZMS	250
A.3	Antriebsstrangparameter	252
B	Modellierung der Motorreibung	253
B.1	Zusammensetzung des Mittelreibdrucks	253
C	Zusätzliche Ergebnisse	255
C.1	ZAR bei sprungförmigem Zylinderfehler	255
C.2	ZAR bei linear zeitvariantem Zylinderfehler	256
C.3	Kombination der ZAR mit LLR bei Lastsprüngen	258
C.4	ZAR Validierung - Übersicht	259
D	Nomenklatur	261
D.1	Konstanten	261
D.2	Abkürzungen	261
D.3	Lateinische Variablen und Symbole	262
D.4	Griechische Variablen und Symbole	266
	Literatur	267
	Lebenslauf	281