



Andreas Unger

Serientaugliche quadratisch optimale Regelung für semiaktive Pkw-Fahrwerke



Audi-Dissertationsreihe, Band 66





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Regelungstechnik

Serientaugliche quadratisch optimale Regelung für semiaktive Pkw-Fahrwerke

Andreas F. Unger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München zur Erlangung
des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Roppenecker,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Die Dissertation wurde am 30.03.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 23.07.2012 angenommen.



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, 2012

Zugl.: (TU) München, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-207-4

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012

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, 2012

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-207-4



Für Elisabeth und für meine Familie.





Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein linear-quadratisch-basierter semiaktiver Fahrwerksregler unter der ausschließlichen Verwendung von Serienkomponenten implementiert und validiert. Dabei wird insbesondere die Serientauglichkeit des Regelungskonzepts umfassend untersucht. Die Validierung durch Messungen zeigt, dass Fahrkomfort und Fahrsicherheit gegenüber der weit verbreiteten Skyhook-Regelung nochmals gesteigert werden. Um den Zustandsvektor auf realen Straßen schätzen zu können, wird ein Beobachter mit einer neuartigen Modifikation des Straßenmodells präsentiert, der niederfrequente Störungen, welche beim Überfahren steil ansteigender Fahrbahnen auf den Beobachter einwirken, zuverlässig filtert. Im Vorfeld wird die Sensorkonfiguration unter Zuhilfenahme eines analytischen Maßes zur Bewertung der Schätzgüte ausgewählt. Dabei wird das Sensorrauschen der Seriensensorik explizit berücksichtigt. Die Auswahl der Regelungsmethode erfolgt im Rahmen eines methodischen Vergleichs zwischen fünf semiaktiven Fahrwerksreglern. In dieser Gegenüberstellung erzielt Clipped Optimal Control das beste Ergebnis bezüglich Implementierungsaufwand und Leistungsfähigkeit. Für die Implementierung von Clipped Optimal Control in einem realen Fahrzeug wird die Parametrierung der quadratischen Kostenfunktion über ein detailliertes Maß für Fahrkomfort und über die Minimierung des Bremswegs als Maß für Fahrsicherheit berücksichtigt. Darüber hinaus wird ein neuartiges nichtlineares Dämpfermodell vorgestellt, welches, trotz weniger Parameter, eine hohe Übereinstimmung mit dem Verhalten eines realen Dämpfers mit starken Hystereseeffekten erreicht. Für die Kompensation dieser Hystereseffekte während der Fahrt, kommt das Modell innerhalb einer dynamischen Vorsteuerung zum Einsatz. Die experimentelle Validierung wird mit zwei unterschiedlichen Fahrzeugen auf einer 7-Stempel Hydropulsanlage und auf realen Straßen durchgeführt. Parametervariationen werden durch eine simulatorische Untersuchung innerhalb eines realistischen Parameterraums untersucht, wobei der Einfluss der Fahrzeugmasse experimentell bestätigt wird. Da die Abstimmbarkeit der Regelungsmethode Clipped Optimal Control eine wesentliche Anforderung für Serienfahrzeuge darstellt, wird eine weich schaltende Reglerstruktur vorgestellt, mit der die Reglerparametrierung an die Vorlieben des Fahrers angepasst werden kann. Des Weiteren wird gezeigt, dass die Quer- und Längsdynamik des Fahrzeugs durch den Einsatz einer fahrzustandsabhängigen adaptiven Fahrwerksregelung verbessert werden kann. Zum Entwurf des Beobachters und des Reglers wird ein Vollfahrzeugmodell verwendet, welches durch Messungen parametrierbar ist.



Abstract

In this Thesis a linear quadratic based semi-active suspension controller is implemented and validated using a real vehicle and series production components only. Especially the applicability of the control concept for series production purposes is thoroughly investigated. It is shown in experiments, that ride comfort and road holding can be significantly improved by using LQ-based suspension control compared to the well-established Skyhook control. In order to estimate the vehicle state on real streets, an observer including a new modified road model is presented, which reliably filters low frequency disturbances induced by ascending or descending steep hills. In advance, an appropriate sensor configuration is chosen using an analytical observability measure, wherein the noise of the stock sensors is considered. The control algorithm is selected in a generalized benchmark of five semi-active suspension controllers in real-time application, where clipped optimal control promises advantages regarding computational effort and performance. For the implementation of clipped optimal control in a vehicle, the parametrization of the quadratic cost function is addressed using a complex measure for ride comfort and the minimization of the braking distance as a measure for ride safety. A novel nonlinear damper model is introduced which, despite its few parameters, substantially matches the behavior of real semi-active dampers with strong hysteresis effects. For the online compensation of these hysteresis effects, the model is employed in a dynamic feedforward control structure. The experimental validation is performed using two different vehicles on a 7-poster test-rig and on real streets. In order to take parameter variations into account, a simulation study is conducted using a realistic parameter range, whereas the variation of the vehicle mass is experimentally verified. As the online tuneability of the clipped optimal controller is essential for series production vehicles, a soft switching control structure is presented for adjusting the controller parametrization to the preferences of the driver. Furthermore, it is shown that the lateral and the longitudinal dynamics of the vehicle can be enhanced by using driving state adaptive suspension control. A full-car model, which is parametrized by measurements on a 7-poster test-rig, is used for the observer and controller design. Additionally, an identified nonlinear full-car model is presented, which is used for purposes of simulation and optimization.



DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank geht an Prof. Boris Lohmann, der stets ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte und mich von Anfang an tatkräftig unterstützte. Die freundschaftliche und ausgesprochen kollegiale Atmosphäre an seinem Lehrstuhl ließ die Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter viel zu schnell vergehen.

Ebenso danke ich Prof. Günther Roppenecker für das Interesse an meiner Arbeit, die fachlichen Anregungen und für die Übernahme des Koreferats. Außerdem danke ich Prof. Markus Lienkamp für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Sehr dankbar für die fortwährende Unterstützung bin ich Dr. Ralf Schwarz, der mir als Abteilungsleiter der AUDI AG das Anfertigen dieser Arbeit ermöglichte und mir stets die notwendigen Freiheiten einräumte. Mein herzlicher Dank gilt Frank Schimmack für die freundschaftliche Zusammenarbeit und seine zahlreichen praxisnahen Anregungen, welche die Dissertation in vielen Punkten bereicherten.

Bei Dr. Guido Koch, Enrico Pellegrini, Nils Pletschen, Sebastian Spirk und allen anderen Kollegen des Lehrstuhls möchte ich mich für die enge und gelungene Zusammenarbeit herzlich bedanken. Die Ideen, die aus dem stets regen Austausch und den wertvollen Diskussionen hervorgegangen sind, finden sich an vielen Stellen dieser Arbeit wieder.

Mein Dank gilt auch allen meinen Studenten, insbesondere Guillermo Falconí, Kay-Uwe Henning und Christoph Schwarz, die durch ihre exzellenten Ergebnisse einen wertvollen Beitrag zum Gelingen der Dissertation geleistet haben.

Bei meiner Frau Elisabeth bedanke ich mich von ganzem Herzen für die Liebe und die Unterstützung, die sie mir unentwegt zukommen ließ.

Mein innigster Dank geht an meine Familie für die Fürsorge und alle Belange umfassende Unterstützung auf meinem Lebensweg.





INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
Glossar	x
Kapitel 1: Einleitung	1
1.1 Umfang der Dissertation	3
1.2 Aufbau der Dissertation	5
Kapitel 2: Semiaktive Fahrwerkssysteme	7
2.1 Modellierung der Fahrbahnanregung	8
2.2 Bauformen von Fahrwerksdämpfern	10
2.3 Modellierung von Fahrwerken	12
2.3.1 Das Vollfahrzeugmodell	12
2.3.2 Das Viertelfahrzeugmodell	16
2.4 Stabilitätsanalyse von semiaktiven Fahrwerken	20
2.5 Beurteilungskriterien für Sicherheit und Komfort	22
2.5.1 Das Komfortmaß nach Hennecke	23
2.5.2 Bremswegverkürzung als Maß für Fahrsicherheit	25
2.6 Stand der Technik	30



2.6.1	Methoden zur Regelung semiaktiver Fahrwerke	30
2.6.2	Dokumentierte Realisierungen semiaktiver Fahrwerksregler	34
2.6.3	Zustandsbeobachter für semiaktive Fahrwerke	37
2.6.4	Modellierung von semiaktiven Dämpfern	38
Kapitel 3: Testumgebung		39
3.1	Konfiguration des Versuchsfahrzeugs	39
3.1.1	Datenverarbeitung	40
3.1.2	Sensorkonfiguration	41
3.2	Konfiguration des Hydropulsprüfstands	41
3.3	Dämpfermodellierung und Parameteridentifikation	42
3.3.1	Ursachen für das nichtlineare Dämpferverhalten	45
3.3.2	Das nichtlineare Dämpfermodell	46
3.3.3	Identifikation der Parameter	48
3.3.4	Validierung des Dämpfermodells	49
3.3.5	Variation der Modellparameter	50
3.4	Fahrzeugmodellierung und Parameteridentifikation	53
3.4.1	Nichtlineare Fahrwerkskomponenten	54
3.4.2	Identifikation der Modellparameter	56
3.4.3	Validierung des Fahrzeugmodells	58
Kapitel 4: Beobachterentwurf		61
4.1	Stochastische Systembeschreibung	61
4.2	Das stationäre Kalman-Bucy-Filter	62
4.3	Auswahl der Sensorkonfiguration	64



4.3.1	Maß zur Bewertung der Schätzgüte	65
4.3.2	Sensorkonfiguration für das Vollfahrzeugmodell	67
4.4	Kompensation niederfrequenter Störungen	70
4.4.1	Lösungsansätze	72
4.4.2	Erweiterung des Straßenmodells	75
4.5	Implementierung	76
4.6	Diskussion der Ergebnisse	80
Kapitel 5:	Reglerauswahl	81
5.1	Problemformulierung	82
5.2	Semiaktive Reglerkonzepte	86
5.2.1	Skyhook-Regler	87
5.2.2	Kombinierter Skyhook- / Groundhook-Regler	87
5.2.3	Clipped Optimal Control (COC)	87
5.2.4	Hybride modellprädiktive Regelung	88
5.2.5	Extended Clipped Optimal Control (ECOC)	92
5.3	Experimentelle Untersuchung	94
5.3.1	Reglerparametrierung	94
5.3.2	Experimentelle Reglerbewertung	95
5.4	Diskussion der Ergebnisse	97
Kapitel 6:	Reglerimplementierung	99
6.1	Clipped Optimal Control im Gesamtfahrzeug	99
6.2	Methoden zur Bestimmung des Dämpferventilstroms	101
6.2.1	Statische Invertierung	101



6.2.2	Dynamische Vorsteuerung	102
6.3	Skyhook-basiertes Referenzsystem	106
6.3.1	Signalbasierte Zustandsgrößenschätzung	107
6.3.2	Skyhook-Regelung des Vollfahrzeugs	111
6.4	Messergebnisse	112
6.5	Variation der Aufbaumasse	118
6.6	Diskussion der Ergebnisse	120
Kapitel 7:	LQ-basierte Dämpferregelung im Serieneinsatz	122
7.1	Simulative Untersuchung von Parametervariationen	122
7.1.1	Abschätzung des Parameterraums	123
7.1.2	Simulative Auswertung	126
7.2	Berücksichtigung der Abstimmbarkeit	129
7.2.1	Schaltende Reglerstruktur	130
7.2.2	Weitere Möglichkeiten zur Beeinflussung des Fahrverhaltens	132
7.3	Übertragbarkeit auf andere Fahrzeuge	136
7.4	Aspekte von Global Chassis Control	142
7.5	Diskussion der Ergebnisse	147
Kapitel 8:	Zusammenfassung und Ausblick	148
Literaturverzeichnis	151
Anhang A:	Zustandsraumdarstellung des Vollfahrzeugmodells	167



ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildungsnummer	Seite
1.1 Konfliktschaubild für passive, semiaktive und vollaktive Fahrwerke.	2
2.1 Leistungsdichtespektren von Straßen und Modellierungsarten.	9
2.2 Aufbau eines Ein- und Zweirohrdämpfers.	11
2.3 Kraftfahrzeug.	12
2.4 Das Vollfahrzeugmodell.	13
2.5 Die Bewegungsformen Huben, Nicken, Wanken und Verwinden.	15
2.6 Das Viertelfahrzeugmodell.	16
2.7 Frequenzgang und invariante Punkte „o“ von $G_{z_a}(s)$, $G_{z_a-z_r}(s)$ und $G_{F_z, \text{dyn}}(s)$ für verschiedene Dämpfungsmaße b_{sa}	19
2.8 Das Komfortmaß nach Hennecke [60].	24
2.9 Die Kennlinien eines Reifens der Dimension 245/40 R18 für verschiedene Normalkräfte.	25
2.10 Bremswegsimulation.	28
2.11 Gemessenes Übertragungsverhalten der Straßenanregung auf die dynamische Radlastschwankung.	29
2.12 Das Skyhook-Prinzip.	31
3.1 Versuchsfahrzeug — Audi Q5 3.0 TDI quattro und Messtechnik.	40
3.2 Das Versuchsfahrzeug auf dem Hydropulsprüfstand.	
3.3 Der Zweirohrdämpfer der Hinterachse.	43



3.4	Quasi-Statistische Dämpferkennlinien.	43
3.5	Quasi-Statistische Dämpferkennlinie und dynamische Messungen.	44
3.6	Das nichtlineare Dämpfermodell.	47
3.7	Dämpfermodell — Vergleich Messung und Simulation bei $i_{D,soll} = 0$ A.	51
3.8	Dämpfermodell — Vergleich Messung und Simulation bei $i_{D,soll} = 0,9$ A.	51
3.9	Dämpfermodell — Vergleich Messung und Simulation bei $i_{D,soll} = 1,8$ A.	51
3.10	Dämpfermodell — Hystereseformen bei 0 A und 16,67 Hz.	52
3.11	Dämpfermodell — Einfluss der Modellparameter.	53
3.12	Das nichtlineare Vollfahrzeugmodell.	54
3.13	Federkennlinien der Vorder- und Hinterachse (ohne Skalierung).	55
3.14	Kennlinie des Reibungsmodells (ohne Skalierung).	55
3.15	Kennlinie der Reifenfeder (ohne Skalierung).	55
3.16	Amplitudengang der dynamischen Radlastschwankung — Messung (-) und Simulation (-) für verschiedene Anregungsamplituden.	57
3.17	Modellvalidierung — Vergleich zwischen Messung und Simulation.	60
4.1	Struktur des Beobachters.	64
4.2	Einfluss der nichtlinearen Kraftaufschaltung auf die Schätzgüte.	65
4.3	Schätzgüte der einzelnen Zustände für verschiedene Sensorkonfigurationen.	70
4.4	Theoretische (li.) und simulierte (re.) Schätzgüte des Beobachters — Vergleich zwischen Federwegen und Federgeschwindigkeiten.	71
4.5	Gemessenes Höhenprofil einer Straße.	72
4.6	Absolute Aufbaugeschwindigkeit auf einer Straße mit 18 % Steigung.	74
4.7	Amplitudengang des ursprünglichen und angepassten Straßenmodells.	76
4.8	Beobachtervalidierung Räder — Vergleich Messung und Schätzung.	78



4.9	Beobachtervalidierung Aufbau — Vergleich Messung und Schätzung.	79
5.1	Der Viertelfahrzeugprüfstand und das Viertelfahrzeugmodell.	82
5.2	Abschätzung des Verstellbereichs eines semiaktiven Dämpfers.	85
5.3	Identifizierte Dämpferkennlinie und virtueller semiaktiver Dämpfer.	85
5.4	Regionen des hybriden MPRs für $N = 1$ und Verstellbereich des Dämpfers. . .	91
5.5	Messsignale der experimentellen Validierung.	96
5.6	Vergleich der Stellgrößen von clipped optimal control und MPR.	97
6.1	Verstellbereich eines realen Dämpfers.	102
6.2	Kennfeld der invertierten quasi-statischen Kennlinien.	103
6.3	Struktur der dynamischen Vorsteuerung.	104
6.4	Vergleich zwischen der dynamischen Vorsteuerung und der statischen Invertierung — Simulation.	105
6.5	Vergleich zwischen der dynamischen Vorsteuerung und der statischen Invertierung — Messung.	106
6.6	Leistungsdichtespektren der Aufbaubeschleunigung (li.) und der Aufbaugeschwindigkeit (re.).	108
6.7	Bodediagramm des Filters für die Aufbaugeschwindigkeit.	109
6.8	Leistungsdichtespektren der Nickrate (li.) und der Wankrate (re.).	110
6.9	Vergleich der signal- und modellbasierten Schätzung der Aufbaugeschwindigkeit.	111
6.10	Signalverarbeitung des Skyhook-basierten Referenzsystems.	112
6.11	Das Skyhook-Prinzip am Gesamtfahrzeug.	113
6.12	Gemessenes Übertragungsverhalten.	114
6.13	Leistungsdichtespektren der Anregungsprofile.	116



6.14	Konfliktschaubilder bei realen Straßenprofilen.	117
6.15	Gemessenes Übertragungsverhalten — beladen und unbeladen.	119
6.16	Konfliktschaubilder bei realen Straßenprofilen — beladen und unbeladen. . .	120
7.1	Vertikale Steifigkeiten verschiedener Reifen.	124
7.2	Temperaturverhalten des Vorderachsdämpfers bei 0,9 A.	125
7.3	Dämpfertemperatur bei einer Kennfeldmessung.	126
7.4	Untersuchter Parameterraum.	126
7.5	Maximale Änderung der Beurteilungskriterien innerhalb des Parameterraums.	128
7.6	Verbesserung im Komfortmaß nach Hennecke im Nominalfall (hell) und im ungünstigsten Fall (dunkel).	129
7.7	Verbesserung in der dynamischen Radlastschwankung im Nominalfall (hell) und im ungünstigsten Fall (dunkel).	130
7.8	Konfliktdiagramme bei Variation der Abstimmparameter.	133
7.9	Strom- (li.) und Kraftausblendung (re.) in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit.	135
7.10	Ventilstrom bei der Strom- oder Kraftausblendung.	136
7.11	Zweites Versuchsfahrzeug — Audi A8 4.2 TDI quattro.	140
7.12	Audi A8 — gemessenes Übertragungsverhalten.	141
7.13	Audi A8 — Konfliktschaubild ermittelt durch ein reales Straßenprofil.	142
7.14	Die nichtlinearen Funktionen h_{a_y} und h_{p_b}	144
7.15	Adaptive Reglerstruktur.	145
7.16	Messung auf einem Handlingkurs.	146



TABELLENVERZEICHNIS

Tabellennummer	Seite
2.1 Parameter des Viertelfahrzeugmodells nach [78].	18
2.2 Mittlere Bremswege.	28
2.3 Messergebnisse bei der Anregung durch ein reales Straßenprofil.	29
2.4 Übersicht der eingesetzten Regelungsmethoden in Serienfahrzeugen.	36
3.1 Ermittelte Werte für das Sensorrauschen.	41
3.2 Parameter der Anregungssignale nach [125] mit modifizierter Wegamplitude.	49
3.3 Anregungssignale für die Validierung des Dämpfermodells.	49
3.4 Übereinstimmung $\Gamma_{\text{Dämpfer}}$ des Dämpfermodells.	50
3.5 Zu Abbildung 3.10 gehörige Parameter.	52
3.6 Parametergruppen zur Parameteridentifikation.	58
4.1 Sensorrauschen zur Bewertung der Sensorkonfigurationen.	68
4.2 Bewertung der Sensorkonfigurationen nach Gleichung (4.15).	68
5.1 Modellparameter nach Koch et. al. [89].	84
5.2 Parameter des virtuellen semiaktiven Dämpfers.	86
5.3 Regelgesetze des MPRs für N=1.	92
5.4 Ergebnisse der experimentellen Reglerbewertung.	95
7.1 Audi A8 — mittlere Bremswege im passiven und im geregelten Fall.	143