

Reihe 12

Verkehrstechnik/
Fahrzeugtechnik

Nr. 805

Dipl.-Ing. Sebastian Claus,
Wiesbaden

Vorausschauende Kompensation von Verzugszeiten im Regelkreis der semiaktiven Fahrwerkregelung

FZD

FAHRZEUGTECHNIK
TU DARMSTADT

Vorausschauende Kompensation von Verzugszeiten im Regelkreis der semiaktiven Fahrwerkregelung

Vom Fachbereich Maschinenbau an der
Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Sebastian Claus
aus Wiesbaden

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

Tag der Einreichung: 02.08.2016

Tag der mündlichen Prüfung: 02.11.2016

Darmstadt 2016

D 17

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/
Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Sebastian Claus,
Wiesbaden

Nr. 805

Vorausschauende
Kompensation von
Verzugszeiten im
Regelkreis der
semiaktiven
Fahrwerkregelung



Claus, Sebastian

Vorausschauende Kompensation von Verzugszeiten im Regelkreis der semiaktiven Fahrwerkregelung

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 805. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

138 Seiten, 86 Bilder, 14 Tabellen.

ISBN 978-3-18-380512-9, ISSN 0178-9449,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

Für die Dokumentation: Fahrwerkregelung – Verstelldämpfer – Dämpferregelung – Vorausschau – Preview – Skyhook – Schaltzeit

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Fahrzeugtechnik. Sie befasst sich mit den Eigenschaften des Regelkreises der semiaktiven Fahrwerkregelung von Fahrzeugen mit Verstelldämpfern und zeigt das Verbesserungspotenzial durch eine vorausschauende Kompensation der im System auftretenden Verzugszeiten. Die Verzugszeiten in der Größenordnung weniger 10 ms entstehen einerseits in der Verarbeitung von Sensorsignalen sowie andererseits durch die elektrischen und hydraulischen Eigenschaften der Schwingungsdämpfer. Im Fokus stehen die Auswirkungen auf den Schwingungskomfort von Kraftfahrzeugen, hierzu wird das Verhalten der Verstelldämpfer auf Kraftebene analysiert. Zur Kompensation von Verzugszeiten wird der erwartete Schwingungszustand unter Berücksichtigung des vor dem Fahrzeug erfassten Fahrbahnhöhenprofils berechnet.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at

<http://dnb.ddb.de>.

D 17

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9449

ISBN 978-3-18-380512-9

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt. Die Inhalte der Dissertation wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes mit der Continental Teves GmbH & Co. oHG und der ZF Friedrichshafen AG erarbeitet.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Wimmer für die Betreuung der Arbeit. Die kritischen Diskussionen und wertvollen Anregungen, aber auch Vertrauen und Wertschätzung haben nicht nur zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, sondern prägten in der Zeit bei FZD meine persönliche Entwicklung.

Herrn Prof. Dr. Ing. Ulrich Konigorski, Leiter des Fachgebiets Regelungstechnik und Mechatronik (rtm) der Technischen Universität Darmstadt, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Bei den Projektpartnern Continental Teves GmbH & Co. oHG und der ZF Friedrichshafen AG möchte ich mich für die Finanzierung, die Unterstützung im Projekt aber auch die stets angenehme Zusammenarbeit bedanken. Stellvertretend für zahlreiche weitere Mitarbeiter beider Unternehmen danke ich an dieser Stelle auch ganz persönlich den Ansprechpartnern Dr. Ing. Thomas Raste und Eberhard Hees. Der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG danke ich für die Bereitstellung des Forschungsfahrzeugs.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, insbesondere auch der Werkstatt und dem Sekretariat. Die angenehme Atmosphäre und das freundschaftliche Miteinander werde ich in guter Erinnerung behalten. Ich freue mich, vielen ehemaligen Kollegen als Freund verbunden zu bleiben. Einschließen möchte ich an dieser Stelle die zahlreichen Studenten, die als studentische Mitarbeiter oder mit ihren wissenschaftlichen Arbeiten einen wertvollen Beitrag zum Gelingen des Forschungsprojektes geleistet haben.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Familie, die mir schon frühzeitig die Chance gegeben hat, das Leben mit eigenständigen Entscheidungen zu gestalten. Gleichzeitig hat sie mir stets den dafür notwendigen Rat und Rückhalt gegeben. Mein Werteverständnis hat dabei vor allem meine Mutter geprägt, die damit einen erheblichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat, auch wenn sie leider diesen Abschnitt meines Lebens nicht mehr miterleben konnte.

Sebastian Claus

Stuttgart, Juli 2016

In Erinnerung an meine Mutter Susi.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	VIII
Formelzeichen und Indizes	IX
Kurzzusammenfassung	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Stand der Forschung und Technik	3
2.1 Fahrwerkregelung	3
2.1.1 Verstelldämpfer	4
2.1.2 Regelung semiaktiver Fahrwerksysteme	5
2.2 Vorausschauende Fahrwerkregelung	12
2.2.1 Erfassung der Straßenanregung	13
2.2.2 Aktive Fahrwerksysteme mit Preview	13
2.2.3 Semiaktive Fahrwerksysteme mit Preview	14
2.3 Ableitung des Forschungsbedarfs	16
3 Methodik und Untersuchungswerkzeuge	18
3.1 Methodik	18
3.2 Simulationsmodell	19
3.2.1 Viertelfahrzeugmodell	20
3.2.2 Modell des Verstelldämpfers	20
3.2.3 Stochastische Anregung	21
3.3 Forschungsfahrzeug	23
3.3.1 Fahrwerk	23
3.3.2 Verstelldämpferregelung	24
3.3.3 Messtechnik	25
3.3.4 Dämpferkraftmessung mit Dehnungsmessstreifen	25
3.4 Dämpferprüfstand	26
3.5 Versuchsgelände Griesheim	27
4 Bewertung von Fahrkomfort	28
4.1 Komfortwahrnehmung	28
4.2 Kenngrößen für Fahrkomfort	30
4.2.1 Effektivwerte der Aufbaubewegung	30
4.2.2 Komfortmaß nach Hennecke	30

4.2.3	Effektivwerte der Aufbaubeschleunigung im Oktavband	31
4.3	Fazit	35
5	Verzugszeiten im semiaktiven Fahrwerk	36
5.1	Entstehung der Verzugszeiten	37
5.1.1	Zeitverzug durch Datenverarbeitung und Filterung	37
5.1.2	Zeitverzug in der Dämpferkraftstellung	40
5.1.3	Verzugszeiten für die Simulation	42
5.2	Komforteinfluss des Zeitverzugs	43
5.3	Wirkkette der Verzugszeiten im Regelkreis	46
5.4	Einflussfaktoren	55
5.4.1	Einfluss der Reglerverstärkung	56
5.4.2	Einfluss der Fahrbahnanregung	61
5.4.3	Dämpfer mit getrennter Zug- und Druckstufenverstellung	67
5.5	Nachweis im Fahrversuch	72
5.5.1	Änderung der Dämpfergeschwindigkeit	72
5.5.2	Abweichungen von der Sollkraft	73
5.6	Zwischenfazit	76
6	Verzugszeitkompensation	78
6.1	Bewertungsansatz für vorauseilende Signale	78
6.2	Simulationsmodell	79
6.2.1	Prädiktionsqualität Dämpfergeschwindigkeitssignal	80
6.2.2	Prädiktionsqualität Aufbaugeschwindigkeitssignal	81
6.3	Skyhook mit Verzugszeitkompensation	82
6.3.1	Kompensation des Verzugs der Dämpfergeschwindigkeit	82
6.3.2	Kompensation des Verzugs der Radgeschwindigkeit	85
6.3.3	Einfluss der Reglerverstärkung	86
6.3.4	Kompensation des Zeitverzugs der Sollkraft	90
6.4	Fazit zur Verzugszeitkompensation	92
7	Validierung im Fahrversuch	94
7.1	Reglerarchitektur	94
7.2	Wheelbase Preview	95
7.2.1	Berechnung des Dämpfergeschwindigkeitssignals	97
7.2.2	Prädiktionsqualität der Dämpfergeschwindigkeit	97
7.2.3	Variation der Nickdämpfung im modalen Skyhook-Regler	98
7.2.4	Auswertung im Frequenzbereich	101
7.3	Kamerabasierte Raddynamik	103
7.3.1	Prädiktionsqualität der Dämpfergeschwindigkeit	104
7.3.2	Kamerabasierte Regelung des modalen Skyhooks	106
8	Fazit	109

9 Ausblick.....	111
A Anhang	113
A.1 Versuchsfahrzeug.....	113
A.2 Verstelldämpfer mit zwei Ventilen	114
A.2.1 Einfluss des Parameters $v_{D, \text{inaktiv}}$	114
A.2.2 Einfluss der Skyhook-Konstante.....	115
A.3 Auswertung der Oktaveffektivwerte	117
Literaturverzeichnis	118
Eigene Veröffentlichungen	124
Betreute studentische Arbeiten	125

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ABS	Anti-Blockier-System
ADD	Acceleration Driven Damper Control
ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer
AUN	Allgemeiner Unebenheitsindex
CAN	Controller Area Network
CDC	Continuous Damping Control
CDCi	Continuous Damping Control mit integriertem Ventil
CDCe	Continuous Damping Control mit externem Ventil
DMS	Dehnungsmessstreifen
ECU	Electronic Control Unit
EMS	Einmassenschwinger
FFT	Fast Fourier Transform
FPGA	Field Programmable Gate Array
FZD	Fachgebiet Fahrzeugtechnik Darmstadt
HiL	Hardware in the Loop
HL	Hinten Links
HR	Hinten Rechts
HU	Huang
LIDAR	Light Detection and Ranging
PAS	Passiv
PASM	Porsche Active Suspension Management
PDCC	Porsche Dynamic Cornering Control
PLC	Phase Lag Compensation
PMD	Photonic Mixer Device
PSD	Power Spectral Density (Spektrale Leistungsdichte)
PWM	Pulsweitenmodulation
RMS	Root Mean Square
RP	Rapid Prototyping
SH	Skyhook
TU	Technische Universität
VL	Vorne Links
VR	Vorne Rechts
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VZ	Verzugszeit
VZK	Verzugszeitkompensation
WBPV	Wheelbase Preview
XCP	Universal Measurement and Calibration Protocol

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	m/s^2	Beschleunigung
c	N/m	Federsteifigkeit
C	-	Korrelationskoeffizient
d	Ns/m	Dämpfkonstante
F	N	Kraft
f	Hz	Frequenz
f_e	Hz	Eigenfrequenz
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
H	-	Übertragungsfunktion
i	-	Übersetzung
i	A	Strom
K	-	Komfortkostenwert
l	m	Radstand
L	H	Induktivität
M	Nm	Moment
P	W	Leistung
R	Ω	Widerstand
s	m	Weg
s	m	Spurweite
t	s	Zeit
T	s	Zeitkonstante
U	V	Spannung
v	m/s	Geschwindigkeit
w	-	Welligkeit
w	-	Gewichtungsfaktor
Δ		Differenz
Φ_h	m^3	Spektrale Unebenheitsdichte
φ	$^\circ$	Wankwinkel
φ_H	$^\circ$	Phasenwinkel
ϑ	$^\circ$	Nickwinkel
τ	s	Zeitverschiebung
τ_G	s	Gruppenlaufzeit
ν	-	Amplitudenspektrum
ω	$1/\text{s}$	Kreisfrequenz
Ω	m	Wegkreisfrequenz
Ω_0	m	Bezugswegkreisfrequenz

Index	Beschreibung
x	in x-Richtung (entspricht Fahrzeug-Longitudinalrichtung)
y	in y-Richtung (entspricht Fahrzeug-Lateralrichtung)
z	in z-Richtung (entspricht Fahrzeug-Vertikalrichtung)
i, k	Zählvariablen
8va	Oktave
A	Aufbau
abs	absolut (Betrag)
D	Dämpfer
dyn	dynamisch
erw	erweitert
eff	effektiv
F	Feder
ges	gesamt
H	hinten
HA	Hinterachse
HL	Hinten links
HR	Hinten rechts
ID	ideal
lim	limitiert
m	Mitte
min	Minimal
max	maximal
q	quell
R	Rad
real	realer Wert
rel	relativ
S	Straße
select	ausgewählter Wert
sgn	Signum
Sky	Skyhook
soll	Sollwert
V	vorne
VA	Vorderachse
VL	Vorne links
VR	Vorne rechts

Kurzzusammenfassung

Semiaktive Fahrwerkregelungen mit verstellbaren Schwingungsdämpfern werden heute in Serienfahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugklassen eingesetzt. Der Zielkonflikt bei der Dämpferabstimmung zwischen einer Maximierung des Fahrkomforts einerseits und einem sicheren Fahrverhalten andererseits kann dadurch teilweise aufgelöst werden. Während für eine Anpassung der Dämpfer an die Fahrsituation eine Verstellzeit im Bereich weniger Sekunden ausreicht, werden für eine kontinuierliche Anpassung der Dämpfereinstellungen an den Schwingungszustand Reaktionszeiten von weniger als zehn Millisekunden angestrebt. Die zunehmende Verfügbarkeit von Sensoren zur Umfeldwahrnehmung (z.B. Stereokameras) führt zur Fragestellung, inwiefern eine vorausschauende Kenntnis des Höhenprofils der Fahrbahn in der semiaktiven Fahrwerkregelung für eine verbesserte Regelqualität genutzt werden kann.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird in einer Analyse des Regelkreises aufgezeigt, dass die Verarbeitung von Sensorsignalen sowie die elektrischen, mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von Verstelldämpfern zu Verzugszeiten im Bereich von 15 bis 30 ms führen. Diese Werte liegen im Bereich der aus der Literatur bekannten Größenordnung. Simulationen mit den Regelstrategien nach Karnopp (Skyhook) und Huang ergeben, dass diese Verzugszeiten des realen Regelkreises bereits zu einem Komfortnachteil im Vergleich zu einem idealen Regelkreis ohne Zeitverzug führen. Die Auswirkung des Zeitverzugs ist dabei von zwei Faktoren abhängig. Einerseits von der Stärke der Anregung (Fahrbahnebenheit und Fahrgeschwindigkeit) sowie andererseits vom durch die Reglerverstärkung vorgegebenen Niveau der Sollkräfte.

Die Untersuchung der Wirkkette vom Entstehen der Verzugszeit bis zur Auswirkung auf die Aufbaubeschleunigung zeigt, dass Abweichungen zwischen der vom Regler vorgegebenen Sollkraft und der tatsächlich wirkenden Dämpferkraft entstehen. Diese sind auf zwei Aspekte zurückzuführen. Zum einen verändert sich während der Zeitspanne des Verzugs die vom Schwingungszustand des Fahrzeugaufbaus abhängige Sollkraft. Zum anderen führt eine Veränderung der Dämpfergeschwindigkeit dazu, dass der in einem inversen Kennfeld ausgewählte Ventilstrom bereits zu einer Dämpfereinstellung führt, in der die von der Dämpfergeschwindigkeit abhängige Dämpferkraft ebenfalls von der Sollkraft abweicht.

Zur Erläuterung dieser Effekte werden die Größen $\Delta v_{D,T,sgn}$ und $\Delta F_{D,rel,abs}$ eingeführt, mit denen die Veränderung der Dämpfergeschwindigkeit sowie die Abweichung von der Sollkraft charakterisiert werden. Zudem werden die Änderungen der Dämpfergeschwindigkeiten sowie das Auftreten der charakteristischen Kraftabweichungen durch die Auswertung von Messungen aus Fahrversuchen nachgewiesen. Hierzu wurden in einem Versuchsfahrzeug mit semiaktiv geregelten Verstelldämpfern die Dämpferkräfte mittels Dehnungsmessstreifen gemessen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird am Beispiel des Skyhook-Reglers untersucht, inwiefern im mit Zeitverzug behafteten System eine vorausseilende Bereitstellung der zur Berechnung der Dämpfereinstellungen herangezogenen Signale eine Verbesserung der Regelung erwarten lässt. Hierzu wurden die vertikale Aufbaugeschwindigkeit sowie die Dämpfergeschwindigkeit in der Simulation parallel unter Verwendung einer vorausseilenden Straßenanregung berechnet. Die Auswertung der Aufbaubeschleunigungen zeigt, dass dadurch der verzugsbedingte Komfortnachteil ausgeglichen werden kann. Dabei reicht eine vorausseilende Bereitstellung der Dämpfergeschwindigkeit bereits aus, erst bei größeren Werten der Skyhook-Konstanten (Reglerverstärkung) ist auch ein Vorausseilen der vertikalen Aufbaugeschwindigkeit erforderlich.

Die Validierung dieser Ergebnisse erfolgte im Fahrversuch durch Messfahrten, die mit dem Versuchsfahrzeug auf der Landebahn des August-Euler-Flugplatzes in Griesheim, einem Versuchsgelände der TU Darmstadt, durchgeführt wurden. Dabei wurden zwei Berechnungsmethoden für vorausseilende Signale der Dämpfergeschwindigkeit verwendet. Einerseits wurden die Dämpfergeschwindigkeiten an der Hinterachse unter Berücksichtigung der über Federwegsensoren ermittelten Dämpfergeschwindigkeiten der Vorderachse prädiiziert (Wheelbase-Preview). Andererseits wurde die vertikale Radgeschwindigkeit unter Verwendung des mit einer Stereokamera erfassten Höhenprofils abgeschätzt.

Die Auswertungen der Aufbaubeschleunigungen zeigen qualitativ, dass das in der Simulation ermittelte Potenzial zur Komfortverbesserung auch für den im Versuchsfahrzeug eingesetzten modalen Skyhook-Regler erreicht werden kann. Wie in der Simulation zeigt der Fahrversuch, dass vor allem für Abstimmungen mit härteren Dämpfereinstellungen (Aufbauberuhigung durch große Skyhook-Konstanten) ein vorausseilendes Signal der Dämpfergeschwindigkeit bei der verwendeten Reglerkonfiguration zu besseren Komfortkennwerten führt.