

# Fortschritt-Berichte VDI

VDI

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>.

---

# 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
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2 Stand der Forschung und Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1 Fahrwerkregelung.....	3
2.1.1 Verstellämpfer .....	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
<b>3 Methodik und Untersuchungswerkzeuge .....</b>	<b>18</b>
3.1 Methodik.....	18
3.2 Simulationsmodell .....	19
3.2.1 Viertelfahrzeugmodell.....	20
3.2.2 Modell des Verstellämpfers .....	20
3.2.3 Stochastische Anregung .....	21
3.3 Forschungsfahrzeug.....	23
3.3.1 Fahrwerk .....	23
3.3.2 Verstellämpferregelung .....	24
3.3.3 Messtechnik.....	25
3.3.4 Dämpferkraftmessung mit Dehnungsmessstreifen .....	25
3.4 Dämpferprüfstand.....	26
3.5 Versuchsgelände Griesheim.....	27
<b>4 Bewertung von Fahrkomfort .....</b>	<b>28</b>
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
<b>5</b>	<b>Verzugszeiten im semiaktiven Fahrwerk.....</b>	<b>36</b>
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
<b>6</b>	<b>Verzugszeitkompensation.....</b>	<b>78</b>
6.1	Bewertungsansatz für vorauselende 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
<b>7</b>	<b>Validierung im Fahrversuch .....</b>	<b>94</b>
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
<b>8</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>109</b>

---

<b>9 Ausblick.....</b>	<b>111</b>
<b>A Anhang .....</b>	<b>113</b>
A.1 Versuchsfahrzeug.....	113
A.2 Verstellämpfer 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
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>118</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen .....</b>	<b>124</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>125</b>

# 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
$a$	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung
$c$	$\text{N/m}$	Federsteifigkeit
$C$	-	Korrelationskoeffizient
$d$	$\text{Ns/m}$	Dämpfkonstante
$F$	N	Kraft
$f$	Hz	Frequenz
$f_e$	Hz	Eigenfrequenz
$g$	$\text{m/s}^2$	Erdbeschleunigung
$h$	m	Höhe
$H$	-	Übertragungsfunktion
$i$	-	Übersetzung
$i$	A	Strom
$K$	-	Komfortenwert
$l$	m	Radstand
$L$	H	Induktivität
$M$	Nm	Moment
$P$	W	Leistung
$R$	$\Omega$	Widerstand
$s$	m	Weg
$s$	m	Spurweite
$t$	s	Zeit
$T$	s	Zeitkonstante
$U$	V	Spannung
$v$	$\text{m/s}$	Geschwindigkeit
$w$	-	Welligkeit
$w$	-	Gewichtungsfaktor
$\Delta$		Differenz
$\Phi_h$	$\text{m}^3$	Spektrale Unebenheitsdichte
$\varphi$	$^\circ$	Wankwinkel
$\varphi_h$	$^\circ$	Phasenwinkel
$\vartheta$	$^\circ$	Nickwinkel
$\tau$	s	Zeitverschiebung
$\tau_G$	s	Gruppenlaufzeit
$\nu$	-	Amplitudenspektrum
$\omega$	1/s	Kreisfrequenz
$\mathcal{Q}$	m	Wegkreisfrequenz
$\mathcal{Q}_0$	m	Bezugswegkreisfrequenz

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
$x$	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. Steuerkameras) 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 (Fahrbahnunebenheit 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 vorauseilende 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 vorauseilenden Straßenanregung berechnet. Die Auswertung der Aufbaubeschleunigungen zeigt, dass dadurch der verzugsbedingte Komfortnachteil ausgeglichen werden kann. Dabei reicht eine vorauseilende Bereitstellung der Dämpfergeschwindigkeit bereits aus, erst bei größeren Werten der Skyhook-Konstanten (Reglerverstärkung) ist auch ein Vorauseilen 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 vorauseilende Signale der Dämpfergeschwindigkeit verwendet. Einerseits wurden die Dämpfergeschwindigkeiten an der Hinterachse unter Berücksichtigung der über Federwegsensoren ermittelten Dämpfergeschwindigkeiten der Vorderachse prädiert (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 vorauseilendes Signal der Dämpfergeschwindigkeit bei der verwendeten Reglerkonfiguration zu besseren Komfortkennwerten führt.