

---

# **Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart**

## **Reihe herausgegeben von**

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten. Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen. Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose. Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal. Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

**Reihe herausgegeben von**

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende  
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss  
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann  
Lehrstuhl Kraftfahrwesen  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

---

Kilian Dettlaff

# Analytische und numerische Einflussanalyse aktiver Fahrwerksysteme

 Springer Vieweg

Kilian Dettlaff  
IVK, Fakultät 7, Lehrstuhl für  
Kraftfahrwesen  
Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2019

D93

ISSN 2567-0042                      ISSN 2567-0352 (electronic)  
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart  
ISBN 978-3-658-29417-5              ISBN 978-3-658-29418-2 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-29418-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

*„Das Auto ist jetzt vollkommen. Es bedarf keiner Verbesserung mehr.“  
Allgemeine Automobil-Zeitung (1921)*

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Rahmen eines Kooperationsprojekts des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart und der AUDI AG in Ingolstadt.

Dem ehemaligen Leiter des Lehrstuhls Kraftfahrwesen des IVK und meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann gilt mein tiefster Dank für die Begleitung der Arbeit in fachlichen und nicht-fachlichen Angelegenheiten. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny danke ich für die Übernahme der Tätigkeit des Mitberichters und Herrn Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Auf Seiten der AUDI AG gilt mein Dank den Herren Dipl.-Ing. Uli Schaaf und Dr.-Ing. Ingo Scharfenbaum. Sie haben diese Arbeit auf der industriellen Seite begleitet. Auch danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner für die Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen für die Anfertigung dieser Arbeit in seiner damaligen Abteilung. Allen weiteren Kollegen im Umfeld der AUDI AG danke ich für die konstruktive und humorvolle Zusammenarbeit in den zurückliegenden Jahren.

Die Bearbeitung des Projekts fand mit Schwerpunkt in Ingolstadt statt. Dennoch gelang es den Herren Dr.-Ing. Jens Neubeck und Dr.-Ing. Werner Krantz auf Seiten des Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) beziehungsweise des IVK immer wieder sich innerhalb kürzester Zeit in das komplexe Thema und meine Fragestellungen hineinzuversetzen. Die Ratschläge, Erfahrungen und Ansichten dieser beiden Herren leisteten einen wesentlichen Benefit für die vorliegende Arbeit und meine persönliche Weiterentwicklung. An dieser Stelle sei auch allen Kollegen des IVK und FKFS gedankt, ich wurde dort immer freundlich aufgenommen und fand fruchtbaren Boden für Diskussionen aller Art.

Viele weitere Personen haben mich seit Beginn meiner akademischen Ausbildung zu diesem Punkt begleitet. Sie betreuten mich in Abschluss-, Projekt-

und Studienarbeiten und letztlich dieser Dissertation und standen mir mit fachlichen und nicht-fachlichen Ratschlägen zur Seite. Eine Aufzählung der Personen sprengt diesen Rahmen, jedoch sei ihnen an dieser Stelle mein Dank für die vielseitige Unterstützung, Motivation und Ratschläge ausgesprochen.

Nicht zu vergessen ist natürlich auch mein Freundeskreis, der mich mit willkommener Abwechslung zu meinem Berufsalltag auf diese spezielle Weise unterstützt hat. Abschließend möchte ich noch meinen Eltern und meinem Bruder danken. Sie haben mir diese Ausbildung ermöglicht und mich immer unterstützt. Dadurch wurde mir die Möglichkeit gegeben mich stets auf die wichtigen Dinge zu konzentrieren. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

München

Kilian Dettlaff

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	VII
Abbildungsverzeichnis .....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XV
Abkürzungsverzeichnis.....	XVII
Symbolverzeichnis .....	XIX
Kurzfassung .....	XXV
Abstract .....	XXVII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation - Bestreben nach Effizienz im Fahrzeug .....	1
1.2 Ziele und Mehrwert der Arbeit.....	4
1.3 Gliederung der Arbeit .....	6
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik .....</b>	<b>9</b>
2.1 Wirkkette aktiver Fahrwerkregelsysteme .....	9
2.2 Modellbildung Fahrdynamik .....	14
2.2.1 Einspurmodell .....	15
2.2.2 Mehrkörpermodelle .....	16
2.3 Objektive Fahreigenschaften.....	17
2.4 Aktive Fahrwerkregelsysteme .....	21
2.4.1 Aktive Fahrwerke .....	21
2.4.2 Aktive Lenksysteme.....	22
2.5 Energiebedarf im Fahrwerk .....	26
2.6 Modellbildung mechatronischer Systeme .....	29
2.7 Numerische Sensitivitätsanalyse.....	30
2.7.1 Elementareffektmethode .....	32
2.7.2 Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse.....	36
2.8 Zusammenfassende Betrachtung .....	37
<b>3 Methode zur Analyse und Bewertung von Fahrwerksystemen .....</b>	<b>39</b>
3.1 Modellbildung aktiver Fahrwerksysteme .....	39
3.1.1 Prüfstandsmanöver .....	40



3.1.2	Experimentelle Modellbildung .....	43
3.1.3	Physikalische Modellbildung .....	45
3.1.4	Exemplarische Synthese und Validierung .....	49
3.1.5	Gegenüberstellung der Modellierungsvarianten .....	54
3.2	Analytische Untersuchungen der Wirkkette .....	56
3.2.1	Analyse der Systemdynamik eines Fahrzeugs mit Allradlenkung .....	57
3.2.2	Definition und Eingrenzung des Zielverhaltens .....	61
3.2.3	Ableitung eines Übertragungsverhaltens für die Vorsteuerung .....	65
3.2.4	Stellgrößeneinsatz und überschlägige Ermittlung des Leistungsbedarfs .....	67
3.2.5	Transfer auf andere Systemdynamiken und weitere Anmerkungen .....	68
3.3	Sensitivitätsanalyse der Wirkkette .....	70
3.3.1	Grundlagen zur numerischen Einflussanalyse der Wirkkette .....	71
3.3.2	Analyse des isolierten Systemverhaltens .....	77
3.3.3	Analyse des erweiterten Systemverhaltens .....	96
3.3.4	Zusammenfassung und Bewertung der Systemanalyse ...	100
3.3.5	Analyse der isolierten Funktionsebene .....	102
3.3.6	Analyse der erweiterten Funktionsebene .....	105
3.3.7	Zusammenfassung und Bewertung der Funktionsanalyse .....	107
<b>4</b>	<b>Bewertung und Analyse eines aktiven Lenksystems .....</b>	<b>111</b>
4.1	Randbedingungen und Zielwerte .....	111
4.2	Applikation anhand objektiver Eigenschaften .....	117
4.3	Ableitung grundlegender Regelsystemcharakteristika .....	123
4.4	Übertragung der Vorüberlegungen .....	124
4.5	Modifikation bestehender Applikationsvarianten .....	127
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>131</b>
	Literaturverzeichnis .....	135

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht durchschnittlicher CO <sub>2</sub> Realemissionen und vorgeschriebener Obergrenzen. ....	2
1.2	Ergebnisse der Befragung, ob das verwendete Kraftfahrzeug mit einem aktiven Fahrwerk ausgestattet ist.....	3
1.3	Beispielhafter Entwicklungsprozess eines Fahrzeugprojekts. ....	5
1.4	Überblick über die wesentlichen Inhalte der Arbeit.....	7
2.1	Wirkkette eines Fahrzeugs mit aktiven Fahrwerkregelsystemen. ....	10
2.2	Mehrkörpermodell mit fünf Massen zur Simulation der Fahrdynamik.....	16
2.3	Variation der Lenkübersetzung $I_v$ der Vorderachse in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.....	23
2.4	Schematischer Aufbau eines generischen mechatronischen Fahrwerkregelsystems.....	29
2.5	Vergleich zweier Samplingstrategien. ....	33
2.6	Vergleich zweier Methoden zur Erzeugung eines Testfelds bei gleicher Anzahl der Elemente. ....	34
2.7	Exemplarische Darstellung der qualitativen Sensitivitätskennwerte nach [10] in der $\mu^*$ - $\sigma$ -Ebene.....	36
3.1	Übersicht über verschiedene Prüfstandsmanöver zur Modellbildung und Analyse aktiver Fahrwerksysteme.....	42
3.2	Darstellung der erhöhten Abbildungsgüte eines Getriebes bei Verwendung eines Reibmodells mit Lastabhängigkeit. ....	48
3.3	Darstellung der Messungen eines Lenksystems in zwei Arbeitspunkten und Vergleich mit verschiedenen Modellphilosophien.....	50
3.4	Abgleich von physikalischem Modell und Messung bei einer Anregungsfrequenz für die Sollposition von etwa 0,1 Hz bei einer mittleren Gegenkraft. ....	51
3.5	Abgleich von physikalischem Modell und Messung bei einer Anregungsfrequenz für die Sollposition von etwa 2 Hz bei einer mittleren Gegenkraft.....	53

3.6	Grafische Interpretation der Systemdynamik eines Fahrzeugs mit aktiven Lenksystemen. ....	57
3.7	Vergleich einer konventionellen Hinterachse mit einer gelenkten Hinterachse.....	63
3.8	Übersicht über die durchgeführten numerischen Sensitivitätsanalysen mit Bezug zur Wirkkette.....	70
3.9	Ablauf der Sensitivitätsanalyse.....	72
3.10	Normiertes Motorkennfeld mit dargestellten Bereichen für eine Limitierung des Drehmoments beziehungsweise der Drehzahl. ....	80
3.11	Skalierter Elementareffekt der isolierten Systemebene.....	83
3.12	Parametereinflüsse auf die maximalen Leistungsaufnahme.....	83
3.13	Streudiagramme bezüglich des Einflusses der maximalen Leistungsaufnahme $P_{max}$ zweier ausgewählter Parameter.....	84
3.14	Parametereinflüsse auf die Eigenschaft der Anstiegszeit auf 63 % des Endwertes. ....	86
3.15	Konvergenz des normierten Haupteffekts der Elementareffektmethode.....	87
3.16	Verlauf des Konvergenzkriteriums $P_{KI}$ für ausgewählte Eigenschaften über den Berechnungsaufrufen. ....	88
3.17	Verlauf des Konvergenzkriteriums $P_{KI}$ für ausgewählte Eigenschaften aufgetragen über den Berechnungsaufrufen der qualitativen Analyse. ....	89
3.18	Einflüsse der Parameter auf die Eigenschaft der maximalen Leistungsaufnahme.....	90
3.19	Einflüsse der Parameter auf die Eigenschaft der Anstiegszeit auf 63 %.....	90
3.20	Verlauf der Sensitivitätsindizes der quantitativen Analyse in Abhängigkeit von den Berechnungsaufrufen. ....	94
3.21	Verlauf der Sensitivitätsindizes der quantitativen Analyse mit zugehörigen Vertrauensbereichen aufgetragen über den Berechnungsaufrufen. ....	95
3.22	Verlauf des Konvergenzkriteriums $P_{KI}$ für zwei ausgewählte Eigenschaften über den Berechnungsaufrufen der quantitativen Analyse. ....	97

3.23	Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse der funktionalen Eigenschaft der Anstiegszeit auf 63 % und der energetischen Eigenschaft der maximalen Leistungsaufnahme $P_{max}$ . .....	98
3.24	Skalierter Elementareffekt des Einflusses der Systemparameter auf die Fahreigenschaften. ....	99
3.25	Parametereinflüsse auf den Phasenverzug der Hinterachse bei einer Anregungsfrequenz von 0,5 Hz. ....	99
3.26	Parametereinflüsse auf die Resonanzfrequenz der Gierbewegung. ....	100
3.27	Einflüsse der Parameter auf die Eigenschaft der Amplitudenverstärkung bei einer Frequenz von 1 Hz. ....	104
3.28	Einflüsse der Parameter auf die Eigenschaft des Phasenverzugs bei einer Frequenz von 2 Hz. ....	104
3.29	Einflüsse der Parameter auf die Fahreigenschaft des Lenkradwinkelbedarfs. ....	105
3.30	Einflüsse der Parameter auf die Fahreigenschaft der Gierüberhöhung. ....	106
3.31	Darstellung von Eigenschaften einer Untermenge des Stichprobenumfangs. ....	107
4.1	Auszug der querdynamischen stationären Fahreigenschaften im Linearbereich der marktbegleitenden Fahrzeuge in Relation zum passiven Fahrzeug. ....	114
4.2	Auszug der querdynamischen instationären Fahreigenschaften der marktbegleitenden Fahrzeuge in Relation zum passiven Fahrzeug. ....	116
4.3	Vergleich der Gierübertragungsfunktionen mit normierter Amplitude des passiven Fahrzeugs, des aktiven Fahrzeugs mit reiner Hinterachslenkung und der finalen Zielpositionierung des aktiven Fahrzeugs bei einer Geschwindigkeit von $100 \text{ km h}^{-1}$ . ....	120
4.4	Analytisch berechnetes Übertragungsverhalten des Hinterachslenkwinkels und zugehörige Verstellgeschwindigkeit in Relation zum Fahrerlenkradwinkel. ....	122
4.5	Analytisch berechnetes Übertragungsverhalten für den Hinterachslenkwinkel und entsprechende Anpassungen zur Realisierung mit einer bestehenden Funktionsstruktur. ....	126
4.6	Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse bezüglich der Fahreigenschaft der Gierüberhöhung und des Phasenverzugs der Gierrate auf den Lenkradwinkel bei einer Frequenz von 0,5 Hz. ....	128

4.7	Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse der Fahreigenschaft der Gierresonanzfrequenz und der Amplitude der Stellgröße bei einer Frequenz von 1,5 Hz.....	129
-----	--	-----

# Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht über die Prüfstandsmanöver für die Systemanalyse und Modellbildung.....	41
3.2	Qualitativer Vergleich der Modellierungsarten und Bewertung. ....	55
3.3	Einteilung der Modellparameter in der Sensitivitätsanalyse nach ihrer Veränderbarkeit während des Fahrbetriebs. ....	78
3.4	Übersicht über den Haupteffekt der isolierten Systemebene. ....	91
3.5	Übersicht über den Totaleffekt der isolierten Systemebene. ....	92
3.6	Auszug aus den Parametersensitivitäten der isolierten und erweiterten Funktionsanalyse.....	109
4.1	Übersicht über die Marktbegleiter für die Zielwertableitung. ....	113

# Abkürzungsverzeichnis

DoE	Design of Experiments
EEM	Elementareffektmethode
EPS	Elektromechanische Lenkung (engl. electromechanical power steering)
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
HIL	Hardware in the Loop
ITAE	Integral of time-multiplied absolute value of error
IVK	Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen
OAT	One-step-at-a-time / One-factor-at-a-time
VBSA	Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Buchstaben

---

$A_i$	Applikationsparameter	-
$a$	Beschleunigung	$\text{m/s}^2$
$B$	Anzahl der Wiederholungen für das Bootstrapping	-
$b$	Laufvariable der Ausgänge einer Übertragungsfunktionsmatrix	-
$c_\alpha$	Achsschräglaufsteifigkeit	$\text{N}^\circ$
$c_y$	Achsquersteifigkeit	$\text{N/m}$
$D$	Dämpfungsgrad	-
$d$	Laufvariable für das Bootstrapping	-
$E$	Erwartungswert	-
$e$	Laufvariable der Eingänge einer Übertragungsfunktionsmatrix	-
$EE$	Elementareffekt (siehe Gl. 2.4 auf Seite 35)	-
$F$	Kraft	$\text{N}$
$f$	Frequenz	$\text{Hz}$
$G$	Übertragungsfunktion	-
$H$	Amplitudengang	-
$\mathbf{I}$	Einheitsmatrix	-
$I$	Übersetzungsverhältnis	-
$i$	Laufvariable der Eingangsgrößen der Sensitivitätsanalyse	-
$J$	Massenträgheitsmoment	$\text{kgm}^2$
$j$	Laufvariable der Ausgangsgrößen der Sensitivitätsanalyse	-
$k$	Anzahl der Eingangsgrößen der Sensitivitätsanalyse	-
$K_P$	Verstärkungsfaktor	-
$l$	Abstand	$\text{m}$
$M$	Drehmoment	$\text{Nm}$



$m$	Masse	kg
$N$	Länge einer Messreihe	-
$n$	Umfang des Berechnungsaufrufs der Sensitivitätsanalyse	-
$P$	Leistungsaufnahme	W
$p$	Anzahl der Ausgangsgrößen der Sensitivitätsanalyse	-
$P_{KI}$	Konfidenzintervall der berechneten Sensitivitätsindizes (siehe Gl. 3.40 auf Seite 74)	-
$P_{SA}$	Prozentuale Abweichung der aktuell berechneten Sensitivitätsindizes bezüglich des vorherigen Berechnungsumfangs (siehe Gl. 3.38 auf Seite 74)	-
$Q$	Optimierungsvariable	-
$q$	Laufvariable der Berechnungsaufrufe der Sensitivitätsanalyse	-
$R$	Bandbreite der Regelungskaskade	Hz
$r$	Anzahl der Wiederholungen der Sensitivitätsanalyse	-
$S$	Haupteffekt (siehe Gl. 2.8 auf Seite 36)	-
$s$	Komplexe Frequenz der Laplacetransformation	1/s
SEE	Skalierter Elementareffekt (siehe Gl. 3.43 auf Seite 76)	-
$S^*$	Beliebiger Sensitivitätsindex (qualitativ oder quantitativ)	-
$S_T$	Totaleffekt (siehe Gl. 2.9 auf Seite 36)	-
$T$	Zeitkonstante	s
$t$	Zeit	s
$t_t$	Totzeit	s
$u$	Stellgröße	-
$u_R$	Wirksame Stellgröße	-
$V$	Varianz	-
$v$	Fahrgeschwindigkeit	m/s

<b>X</b>	Gesamtheit der Eingangsgrößen der Sensitivitätsanalyse	-
<i>X</i>	Skalare Eingangsgröße der Sensitivitätsanalyse	-
<i>X</i> *	Zufälliger Startpunkt für eine Trajektorie der Elementareffektmethode	-
<b>Y</b>	Gesamtheit der Ausgangsgrößen der Sensitivitätsanalyse	-
<i>Y</i>	Skalare Ausgangsgröße der Sensitivitätsanalyse	-
<i>z</i>	Größe einer Messreihe im Zeitbereich	-

---

### Griechische Buchstaben

---

$\Delta$	Unterschied eines Parameters zwischen zwei aufeinanderfolgenden Berechnungsaufrufen der Elementareffektmethode (siehe Gl. 2.3 auf Seite 33)	-
$\delta$	Lenkwinkel (radbezogen oder fahrerbezogen)	$^\circ$
$\varepsilon$	Regelabweichung	-
$\Gamma$	Gütefunktional	-
$\kappa$	Signifikanzniveau	-
$\lambda$	Einlauflänge	m
$\mu$	Mittelwert der Elementareffekte (siehe Gl. 2.5 auf Seite 35)	-
$\mu^*$	Mittelwert der absoluten Elementareffekte (siehe Gl. 2.7 auf Seite 35)	-
$\Omega$	Parameterraum der Elementareffektmethode	-
$\varphi$	Phasenwinkel	$^\circ$
$\phi$	Drehwinkel	$^\circ$
$\Pi$	Anzahl der Unterteilungen des Parameterraums der Elementareffektmethode	-
$\psi$	Giergeschwindigkeit	$^\circ/\text{s}$
$\rho$	Krümmungsradius	m
$\sigma$	Standardabweichung der Elementareffekte (siehe Gl. 2.6 auf Seite 35)	-

$\tau$	Normalisierte Form der Quadratwurzel des mittleren Fehlerquadrats (siehe Gl. 3.38 auf Seite 74)	-
--------	---	---

---

### Indizes

---

• <i>d</i>	Größe aus dem Bootstrappingverfahren	-
• <i>dyn</i>	Bezug zu einem dynamischen Bewegungszustand	-
• <i>EEM</i>	Bezug zur Elementareffektmethode	-
• <i>FR</i>	Bezug zur Fahrzeugregelung	-
• <i>FWA</i>	Bezug zur Aktorik des Fahrwerkregelsystems	-
• <i>FWS</i>	Bezug zur Vorsteuerungsmatrix	-
• <i>FZG</i>	Bezug zum passiven Fahrzeug	-
• <i>FZGA</i>	Bezug zum aktuierten Fahrzeug	-
• <i>FZGAV</i>	Bezug zum aktuierten und vorgesteuerten Fahrzeug	-
• <i>h</i>	Hinterachse	-
• <i>HAL</i>	Bezug zur Hinterachslenkung (radbezogen)	-
• <i>ist</i>	Istgröße	-
• <i>LR</i>	Bezug zum Lenkradwinkel (fahrerbezogen)	-
• <i>M</i>	Elektromotorische Größe	-
• $\bar{\phantom{x}}$	Arithmetischer Mittelwert	-
• <i>max</i>	Angabe des Maximalwerts	-
• <i>max</i>	Angabe der oberen Parametergrenze	-
• <i>min</i>	Angabe der unteren Parametergrenze	-
• <i>NM</i>	Angabe der Normierung auf den Maximalwert (siehe Gl. 3.44 auf Seite 76)	-
• <i>NS</i>	Angabe der Normierung über die Summe (siehe Gl. 3.45 auf Seite 76)	-
• <i>OG</i>	Angabe der oberen Grenze des Konfidenzintervalls	-
• <i>R</i>	Dissipative Größe	-
• <i>REF</i>	Referenzfahrverhalten	-
• <i>SHA</i>	Bezug zur Vorsteuerung der Hinterachse	-

---

• <i>SHAG</i>	Bezug zur Geschwindigkeit der Vorsteuerung der Hinterachse	-
• <i>soll</i>	Sollgröße	-
• <i>stat</i>	Bezug zu einem stationären Bewegungszustand	-
• <i>SVA</i>	Bezug zur Vorsteuerung der Vorderachse	-
• <i>UG</i>	Angabe der unteren Grenze des Konfidenzintervalls	-
• <i>v</i>	Vorderachse	-
• <i>VAL</i>	Bezug zur Vorderachslenkung (radbezogen)	-
• <i>VBSA</i>	Bezug zur varianzbasierten Sensitivitätsanalyse	-
∧	Explizite Kennzeichnung einer Messgröße beim Vergleich mit einem Modell	-

# Kurzfassung

Aktive Fahrwerkregelsysteme finden vermehrt Einzug in Personenkraftwagen. Darunter fallen unter anderem Hinterachslenkungen, Vorderachsüberlagerungslenkungen oder Aktivfahrwerke. Sie erhöhen einerseits das Fahrerlebnis für den Kunden, stellen jedoch zusätzliche Verbraucher von Energie dar. In Zeiten von immer strenger werdenden Grenzwerten für Schadstoffemissionen und dem Wunsch nach immer höheren Reichweiten sind weitere Verbraucher kontraproduktiv. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher, eine Methode zu schaffen, die in den verschiedenen Phasen des Entwicklungsprozesses ermöglicht die komplexen funktionalen und energetischen Wechselwirkungen von Fahrwerkregelsystemen zu analysieren.

Ein virtuelles Abbild der gesamten Wirkkette von aktiven Fahrwerkregelsystemen ist notwendig, um die Analysen durchzuführen. Ausgehend von Prüfstandsmessungen wird sowohl eine einfache als auch detailliertere Modellierungsart für Fahrwerkregelsysteme dargelegt und an einem Beispiel validiert.

Die Simulationsmodelle der gesamten Wirkkette werden verwendet, um eine analytische Betrachtung der Einflüsse innerhalb der Wirkkette durchzuführen. Die verwendeten Modelle sind von einfacher Struktur und geringer Komplexität. Das Ergebnis ist ein aus objektiven Fahreigenschaften abgeleitetes Zielverhalten für die Fahrzeugregelung. Darüber hinaus resultiert daraus eine erste Abschätzung der notwendigen Anforderungen an das Regelsystem zur Unterstützung der Systementwicklung.

In der späten Phase des Entwicklungsprozesses existieren genauere und komplexere Modelle für die einzelnen Elemente der Wirkkette von Fahrwerkregelsystemen. Diese Modelle werden in der Arbeit einer Einflussanalyse unterzogen. Es werden numerische Methoden der Sensitivitätsanalyse verwendet. Die Eingangsgrößen sind die Modellparameter des Regelsystems beziehungsweise die Applikationsparameter der Fahrzeugregelung. Für das Regelsystem lässt sich die Leistungsfähigkeit und der Energiebedarf des Systems in Abhängigkeit der Modellparameter bewerten. In einem weiteren Schritt wird der Einfluss auf die objektiven Fahreigenschaften ermittelt. In Bezug auf die Fahr-

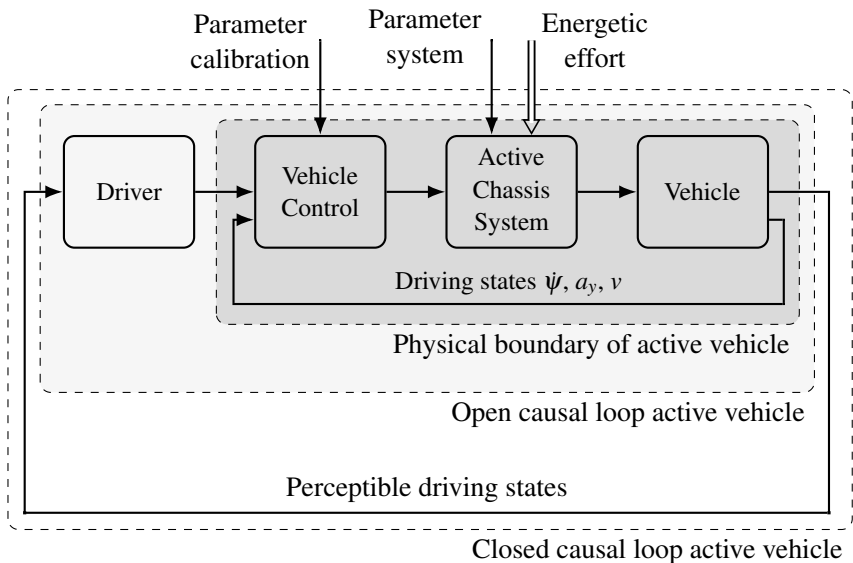
zeugregelung werden die Auswirkungen von Parameteränderungen auf die Gestalt der Stellgröße und das Fahrverhalten dargestellt. Das Ergebnis dieses Untersuchungsschritts ist somit der Zusammenhang zwischen System- und Fahrzeugregelungseinflüssen auf den Energiebedarf und die Fahreigenschaften.

Das oben genannte Ziel zur Entwicklung einer Methode zur Einflussanalyse von Fahrwerkregelsystemen wurde durch die vorgestellten Schritte erreicht und an einem repräsentativen Anwendungsbeispiel nachgewiesen. Die Vielzahl der Veränderlichen innerhalb der Wirkkette kann systematisch variiert werden und deren Einflüsse auf das vom Kunden erlebbare Fahrverhalten sowie den Energiebedarf bewertet werden.

# Abstract

Active Chassis Systems have attained an increasing market share within the passenger-vehicle segment. Such systems are Rear-Wheel Steering, Active Front Steering or Active Suspension Systems. They enhance the driving experience, but are additional energy consumers. Taking legislative requirements for reduction of emissions into consideration, those additional energy consumers are undesirable. Accordingly, the objective of the present thesis is to create a methodology for analysing the complex interactions of Active Chassis Systems. Both functional and energetic characteristics are taken into consideration.

To facilitate a fundamental understanding, the causal loop of Active Chassis Systems is presented. Figure 1 shows the main components involved and their interaction.



**Figure 1:** Causal loop of Active Chassis Systems.

The input of the driver together with vehicle states serve as input for vehicle control. It calculates target values for the Active Chassis System according to the calibration parameters and algorithm used. The movement of the vehicle is influenced by the aforementioned system. Both the vehicle-control and the active-chassis-system module are subjected to a thorough analysis in the present thesis.

In order to conduct a simulative analysis for the causal loop, it is necessary to develop virtual representations of the system itself. This process is supported by specified test-rig profiles. Two modelling philosophies are outlined and shown for an exemplary system.

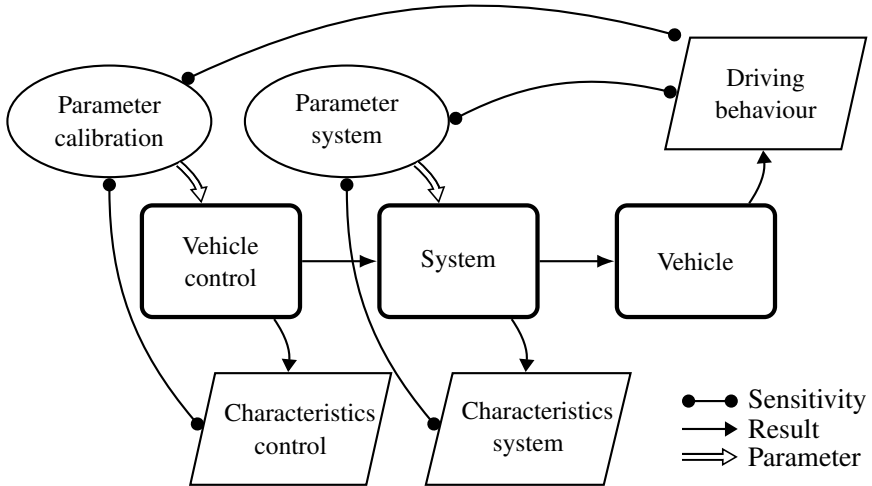
One part of the main methodology is an analytical examination of the causal loop targeting the early phase of development. The elements are simplified to linear transfer functions. This increases the ease of use and ability for interpretation. Additionally, simple models meet the concerns of the early development phase with few known parameters and their high uncertainty. This step delivers a target control behaviour for the vehicle-control component. Because it uses objective driving characteristics as input, this method diverges from known approaches. The behaviour can be used to arrive at a first estimation of the necessary characteristics of the system. For example, the necessary displacement or actuator speed can be derived. Even at this early stage, multiple target characteristics can be compared and evaluated in a qualitative manner in terms of the required electric energy.

The next step of the method is a numerical sensitivity analysis of the components. In terms of the algorithms used, both qualitative and quantitative measures are calculated. The objects under analysis are outlined in Figure 2.

Both system and vehicle control are subjected to a two-step analysis. For the system, the first step shows the influence of input parameters on functional and energetic characteristics. Here the system is analysed separately. The following step of the sensitivity analysis correlates the same inputs, namely the system parameters, with the objective driving characteristics as output.

For the vehicle control component, calibration parameters and characteristics regarding the output target value are first brought into correlation. Measures to manipulate the output of this component and energy consumption are shown.





**Figure 2:** Overview of conducted numerical sensitivity analyses.

This is followed by changing the output values for the sensitivity analysis to objective driving characteristics, which reveals the relationship of calibration parameters and the effect on the driving behaviour of the vehicle. As a result, significant enhancements of the testing phase in prototype vehicles can be proposed.

Finally, the above-mentioned method is applied to the example of a vehicle project to show its capabilities. Target values for the objective driving characteristics are derived with respect to the market of available vehicles. These characteristics serve as input for the above-mentioned analytical process. The result, a target behaviour for the control component, is further adapted to be realisable by an existing control architecture. This process is supported by the numerical part of the analysis. The sensitivity of the real control component regarding its output provides valuable support in achieving the analytically derived target behaviour.

The concluding chapter contains a summary of the main results, with each of the above-mentioned sections covered. Recommendations for further work are given.

The thesis is further supported by English publications; see [16, 17, 18].