

Max Philipp May

## Methoden zur integralen Absicherung von Fahrwerksregelfunktionen

Band 76

**Berichte aus dem  
Institut für Systemdynamik  
Universität Stuttgart**



# Methoden zur integralen Absicherung von Fahrwerksregelfunktionen

Von der Fakultät  
Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
Max Philipp May  
geboren in Filderstadt

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Oliver Sawodny  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Findeisen  
Tag der mündlichen Prüfung: 10.04.2024

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2024







Berichte aus dem  
Institut für Systemdynamik  
Universität Stuttgart

Band 76

**Max Philipp May**

**Methoden zur integralen Absicherung von  
Fahrwerksregelfunktionen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)  
Shaker Verlag  
Düren 2024

## **Bibliografische Informationen 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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9521-0

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH

Adresse: Am Langen Graben 15a, 52353 Düren, Deutschland

Telefon: +49 2421 99011-0    Telefax: +49 2421 99011-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de)    E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*I would rather have questions that can't be answered than answers that can't be questioned.*

Richard P. Feynman  
1918–1988





# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit der Audi AG.

Ich möchte mich ganz herzlich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Oliver Sawodny für das in mich gesetzte Vertrauen und das Ermöglichen dieser Arbeit an der Universität Stuttgart bedanken. Ich danke Prof. Dr.-Ing. Rolf Findeisen für die Durchsicht der Arbeit als Mitberichter und Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Besonders hervorheben möchte ich auch die Begleitung des Projekts seitens der Audi AG durch Dr.-Ing. Jürgen Schuller und Günther Schönberger. Weiterhin danke ich Herrn Dr.-Ing. Kay-Uwe Henning für den tiefgehenden fachlichen Austausch und die Hilfe bei der Umsetzung der Funktionen im Versuchsträger. Großer Dank gilt allen Kollegen am Institut für Systemdynamik für die wunderbare Zeit, den Spaß und die fruchtbaren Diskussionen während der Kaffeepausen.

Abschließend danke ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Mira und Gottfried, für die fortwährende Unterstützung und den Glauben an meine Fähigkeiten. Außerdem danke ich meiner Verlobten Anne-Marie von ganzem Herzen für ihre Geduld und die aufbauenden Worte in jedem Abschnitt meiner Promotionszeit.

Stuttgart, im April 2024

Max May



# Kurzfassung

Die Anforderungen an den Komfort, die Sicherheit und die Agilität moderner Fahrzeuge steigt immer weiter an. Zusatzsysteme und Fahrassistenten, die früher nur in Oberklassefahrzeugen zu finden waren, kommen mittlerweile auch in der Mittelklasse und bei Kleinwagen zum Einsatz. Sicherheitsrelevante Systeme, wie z.B. das Anti-Blockiersystem oder Elektronische Stabilitätsprogramm, sind sogar bei der Zulassung neuer Fahrzeuge gesetzlich vorgeschrieben. Aber auch andere Fahrwerksregelsysteme, wie beispielsweise eine Überlagerungslenkung an der Vorderachse, Torque-Vectoring Getriebe oder eine Hinterachslenkung tragen zur Verbesserung des Komforts und der Agilität des Fahrwerks bei. Durch die Weiterentwicklung und den Einbau zusätzlicher Systeme steigt allerdings auch die Komplexität des Gesamtsystems immer weiter an. Dadurch ergeben sich eine Vielzahl möglicher Fehlerquellen in der Aktorik und Sensorik, die im Fall einer Fehlfunktion die Stabilität und Fahrsicherheit erheblich beeinflussen können. Um den sicheren Betrieb der Kraftfahrzeuge zu gewährleisten, werden daher Maßnahmen zur Funktionalen Sicherheit der Systeme getroffen, die z.B. abhängig von verschiedenen Messgrößen die geforderten Stellgrößen der Regelsysteme plausibilisieren und falls erforderlich begrenzen. Die Abstimmung dieser Systeme ist mit großem Aufwand und vielen Testfahrten verbunden. Außerdem müssen auch Wechselwirkungen zwischen den Systemen untersucht und berücksichtigt werden.

In dieser Arbeit wird daher ein Konzept zur integralen Absicherung der Fahrwerksregelfunktionen vorgestellt. Dabei werden als Fahrwerksaktoren radindividuelle Bremsmomente, eine Hinterachslenkung und ein Torque-Vectoring Getriebe an der Hinterachse betrachtet. Zunächst wird ein nichtlineares Zweispurmodell zur Simulation und ein vereinfachtes Zweispurmodell für online Berechnungen hergeleitet und anhand von Messungen validiert. Das vereinfachte Zweispurmodell wird in einem erweiterten Kalman Filter zur Fahrzustandsschätzung und Fehlerdiagnose für die gemessene Längs- und Querschleunigung und Gierrate verwendet. Um falsch-positive Detektionen durch Straßenneigung zu vermeiden, wird das erweiterte Kalman Filter mit einem Beobachter mit unbekanntem Eingängen zur Störgrößenentkopplung kombiniert. Nachfolgend wird ein modellprädiktiver Optimierungsalgorithmus zur adaptiven Reduktion der Stellgrößen präsentiert. Dieser nutzt die abgesicherte Zustands-

schätzung des erweiterten Kalman Filters als Anfangsbedingung um das durch die gewünschten Stellgrößen verursachte Fahrzeugverhalten in die Zukunft zu präzisieren. Beim Auftreten zu großer Abweichungen von einem aus den Fahrereingaben berechneten Referenzverhalten werden die Stellgrößen als Lösung des Optimierungsproblems entsprechend reduziert. Die Abstimmung des Algorithmus erfolgt über die intuitive Festlegung der tolerierbaren Abweichung von der Referenztrajektorie. Außerdem kann die Funktion durch Anpassen der physikalischen Parameter auf beliebige Fahrzeugmodelle angewendet werden. Dadurch wird die Freigabe neuer Softwarestände von Fahrwerksregelsystemen bei Prototypen erleichtert und beschleunigt.

# Abstract

The demands on the comfort, safety and agility of modern vehicles are constantly increasing. Additional systems and driving assistants that were previously only found in luxury class vehicles are now also being used in mid-size and small cars. Safety-relevant systems, such as the anti-lock braking system or electronic stability program, are even required by law for the homologation of new vehicles. However, other chassis control systems, such as superimposed electric power steering on the front axle, a torque-vectoring transmission or rear-wheel steering, also contribute to improving the comfort and agility of the chassis. However, the further development and integration of additional systems also increases the complexity of the overall system. This results in a large number of possible sources of faults in the actuators and sensors, which can have a significant impact on the stability and safety in the event of a malfunction. In order to ensure the safe operation of motor vehicles, measures are therefore taken to ensure the functional safety of the systems, which, e. g. , check the plausibility of the requested inputs of the control systems depending on various measurements. Then, the respective inputs are limited if necessary. Tuning these systems involves a great deal of effort and many test drives. In addition, interactions between the systems must also be investigated and taken into account.

This thesis therefore presents a concept for the integral safety of chassis control functions. Individual wheel braking torques, a rear-wheel steering system and a torque-vectoring transmission on the rear axle are considered as chassis actuators. First, a non-linear dual-track model for simulation and a simplified dual-track model for online calculations are derived and validated using measurements. The simplified dual-track model is used in an extended Kalman filter for state estimation and fault diagnosis of the measured longitudinal and lateral acceleration and yaw rate. To avoid false-positive detections due to road banking, the extended Kalman filter is combined with an unknown input observer for disturbance decoupling. Second, a model-predictive optimization algorithm for adaptive reduction of the control inputs is presented. The algorithm uses the safe state estimate of the extended Kalman filter as an initial condition to predict the vehicle behavior caused by the requested control inputs. If the deviations from a reference trajectory calculated from

the driver inputs are too large, the control inputs are reduced accordingly as a solution to the optimization problem. The algorithm can be intuitively tuned by adjusting the tolerable deviation from the reference trajectory. Furthermore, the algorithm can be applied to any vehicle model by adjusting the physical parameters. Thereby, the release of new software for chassis control systems of prototypes can be simplified and accelerated.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Stand der Technik . . . . .	3
1.1.1	Fehlerdiagnose für fahrdynamische Systeme . . . . .	4
1.1.2	Absicherung von Stelleingriffen . . . . .	9
1.2	Ziele der Arbeit . . . . .	11
1.3	Struktur der Arbeit . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Absicherungskonzept und Versuchsträger</b>	<b>15</b>
2.1	Integrales Sicherheitskonzept . . . . .	15
2.2	Versuchsträger . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Modellierung der Querdynamik</b>	<b>23</b>
3.1	Koordinatensysteme . . . . .	23
3.2	Nichtlineares Simulationsmodell . . . . .	26
3.2.1	Dynamik des Schwerpunkts . . . . .	26
3.2.2	Gier-, Nick- und Wankdynamik . . . . .	27
3.2.3	Magic Formula Reifenmodell . . . . .	30
3.2.4	Effekte der Fahrwerkskinematik . . . . .	34
3.2.5	Antriebs- und Bremsmomentenberechnung . . . . .	38
3.2.6	Modellübersicht . . . . .	39
3.2.7	Modellvalidierung . . . . .	42
3.3	Vereinfachtes Modell . . . . .	45
3.3.1	Bewegungsgleichungen . . . . .	45
3.3.2	Stationäre Nick- und Wankdynamik . . . . .	45
3.3.3	Vereinfachtes Magic Formula Reifenmodell . . . . .	48
3.3.4	Modellübersicht . . . . .	51
3.3.5	Modellvalidierung . . . . .	53
3.4	Lineares Einspurmodell . . . . .	54
3.4.1	Bewegungsgleichungen . . . . .	56
3.4.2	Modellvalidierung . . . . .	59
3.5	Modellvergleich . . . . .	60



<b>4</b>	<b>Methoden zur integralen Absicherung</b>	<b>65</b>
4.1	Systemanalyse unter Fehlereinflüssen . . . . .	66
4.1.1	Detektierbarkeit und Isolierbarkeit . . . . .	68
4.1.2	Analyse im Paritätsraum . . . . .	70
4.1.3	Strukturanalyse . . . . .	77
4.2	Modellbasierte Fehlerdiagnose . . . . .	86
4.2.1	Beard-Jones-Fehlerdetektionsfilter . . . . .	86
4.2.2	Beobachter mit unbekanntem Eingängen (Unknown Input Observer) . . . . .	93
4.2.3	Zweistufiges Kalman Filter . . . . .	100
4.2.4	Sensorfehlerdiagnose mittels Safety Master . . . . .	110
4.2.5	Messergebnisse Safety Master . . . . .	114
4.3	Optimierungsbasierte Stellgrößenreduktion mittels Safety Barriere	121
4.3.1	Hinterachslenkung und Torque Vectoring . . . . .	124
4.3.2	Referenztrajektorie . . . . .	132
4.3.3	Stellgrößenbeschränkung und Eingangs-Kräfte-Mapping	136
4.3.4	Optimierungsproblem . . . . .	145
4.3.5	Messergebnisse der Safety Barriere . . . . .	153
4.3.6	Simulation der Safety Barriere bei Niedrigreibwert . . .	161
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>167</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>170</b>
A.1	Parameter Fahrdynamikmodelle . . . . .	171
A.2	Entkopplung eines Störgrößendurchgriffs für den UIO . . . . .	173
A.3	Zeitdiskretisierung und Linearisierung . . . . .	174
A.4	Kondensierung der Entscheidungsvariablen . . . . .	179
	<b>Abkürzungen</b>	<b>184</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>185</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>198</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>203</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>204</b>