

Kay-Uwe Henning

Integrierte Querdynamikregelung eines überaktuierten Kraftfahrzeugs

Band 43

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



Integrierte Querdynamikregelung eines überaktuierten Kraftfahrzeugs

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

von

Kay-Uwe Henning
geboren in Hermannstadt

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann

Tag der mündlichen Prüfung: 28. September 2018

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2018

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 43

Kay-Uwe Henning

**Integrierte Querdynamikregelung eines
überaktuierten Kraftfahrzeugs**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6337-0

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik an der Universität Stuttgart in einem HIN-Kooperationsprojekt mit der Audi AG.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny für sein entgegengebrachtes Vertrauen und den nötigen Freiraum zur Gestaltung der Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann danke ich in seiner Rolle als Mitberichter und Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Vielen Dank an die Kollegen der Vorentwicklung Fahrwerk der Audi AG, die diese Arbeit erst ermöglicht haben. Insbesondere danke ich Dr.-Ing. Anton Obermüller, Peter Kunsch und Dr.-Ing. Armin Schöpfel für die Initiierung des Themas der integrierten Querdynamikregelung, ihre organisatorische Unterstützung, die Bereitstellung des Versuchsträgers und das in mich gesetzte Vertrauen. Dr.-Ing. Andreas Unger möchte ich für die Betreuung der Arbeit, die wertvollen fachlichen Gespräche und die Durchsicht des Manuskripts danken. Auch möchte ich Christos Karajannidis für den fruchtbaren fachlichen Austausch danken.

Ein weiterer Dank gilt allen Studenten, die durch ihre Bachelor- und Masterarbeiten ihren Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Herzlichen Dank an die Kollegen vom Institut für Systemdynamik, insbesondere der Mitglieder der Automotive-Gruppe.

Meinen Eltern Edgar und Rita Henning möchte ich für ihre stetige Unterstützung während meiner Ausbildung ganz herzlich danken. Sie haben mir den Freiraum gegeben meinen eigenen Weg zu gehen.

Ganz besonders danke ich meiner Frau Marina für ihre Geduld und ihr Verständnis während der Promotionszeit.

Kurzfassung

Einer der großen Industriezweige in Deutschland ist die Automobilindustrie. Gerade die deutschen Hersteller genießen weltweit einen guten Ruf und nehmen auf dem Weltmarkt eine wichtige Rolle ein. Um diese Position zu halten, werden die Fahrzeuge in allen Bereichen kontinuierlich weiterentwickelt. Im Bereich der Fahrwerksentwicklung stehen dabei besonders die Fahrsicherheit, der Fahrkomfort und der Fahrspaß im Vordergrund der Entwicklungen. Um die Fahrwerke über die begrenzten Möglichkeiten konventioneller passiver Fahrwerke hinaus zu verbessern, werden zunehmend aktive Fahrwerksysteme, wie beispielsweise aktive Vorder- und Hinterachslenkungen oder Torque-Vectoring Getriebe, eingeführt. Bei der Regelung der Querdynamik des Fahrzeugs eignen sich diese jeweils für unterschiedliche Aufgaben und Einsatzbereiche. Durch die Kombination mehrerer Fahrwerksysteme entstehen überaktivierte Fahrzeuge. Das heißt, dass mehr Stellgrößen der Fahrwerksysteme zur Verfügung stehen, als Sollgrößen der Fahrzeugbewegung existieren. Dadurch entstehen Freiheitsgrade bei der Regelung, die die Frage aufwerfen, welches Fahrwerksystem wann einzusetzen ist.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einer integrierten Querdynamikregelung eines überaktivierte Kraftfahrzeugs mit einer Überlagerungslenkung, einer Hinterachslenkung, einem Torque-Vectoring Getriebe und radindividuellen Bremsen. Dabei wird ein Konzept entwickelt, das sowohl die Regelung der Querdynamik bis in den Grenzbereich und die optimale Verteilung der Stellgrößen der Systeme als auch die für eine Serienanwendung für die Regelung benötigte Zustands- und Reibwertschätzung enthält. Das vorgestellte Konzept wird simulativ und mit Hilfe eines Versuchsfahrzeugs validiert.

Zunächst wird ein Simulationsmodell mit 14 Freiheitsgraden aufgestellt und validiert, welches die Dynamik eines Kraftfahrzeugs realitätsnah abbildet. Unter Berücksichtigung der wichtigsten Fahrwerkseffekte wird davon ausgehend ein vereinfachtes Fahrdynamikmodell mit drei Freiheitsgraden abgeleitet und ebenfalls validiert.

Dieses wird anschließend in einem Kalman Filter für die Zustands- und Reibwertschätzung zur Anwendung gebracht. Es wird ein Konzept für die Schätzung vorgestellt, das realistische Randbedingungen wie geneigte Fahrbahnen, Kuppen und Senken sowie sich ändernde Reibwertverhältnisse und Fahrten bis in den Grenzbereich berücksichtigt und lediglich in der Serie verfügbare Sensorik verwendet. Zur Implementierung im Fahrzeug benötigte Algorithmen werden vorgestellt und die Zustands- und Reibwertschätzung wird mit realen Messdaten validiert.

Darauf folgend wird ein neues Konzept für die integrierte Querdynamikregelung vorgeschlagen, das im Fahrzeug realisiert werden kann. Dieses beinhaltet eine Online-Trajektorien-generierung, die anhand der Fahrereingaben mit Hilfe eines Referenzmodells geeignete und bei aktuell geschätztem Reibwert erreichbare Sollgrößen für die Fahrzeugbewegung generiert. Es werden geeignete Einstellparameter vorgestellt, mit denen wichtige querdynamische Eigenschaften eines Kraftfahrzeugs, wie beispielsweise der Lenkradwinkelbedarf oder das Eingelenkverhalten, direkt parametrisiert werden können.

Die Sollgrößen der Fahrzeugbewegung werden mit Hilfe einer Vorsteuerung, einer Ausgangsrückführung und einer Stellgrößenoptimierung eingeregelt. Für letztere wird eine Methode vor-

gestellt, welche das vereinfachte Fahrdynamikmodell in optimaler Weise invertiert und gleichzeitig Stellgrößen- und Ratenbeschränkungen berücksichtigt. Dafür wird ein konvexes Optimierungsproblem aufgestellt und in Echtzeit gelöst.

Die integrierte Querdynamikregelung wird in drei verschiedenen Strukturen realisiert. Eine Vorsteuerung, eine Regelung mit einer Zustandsparametrierung der Stellgrößenoptimierung durch die Istgrößen bzw. die Schätzgrößen des Kalman Filters und eine Regelung mit einer Zustandsparametrierung durch die Sollgrößen.

Die drei Strukturen werden in der Simulation validiert und die Eigenschaften diskutiert. Anschließend werden die Strukturen im Versuchsfahrzeug implementiert und anhand von unterschiedlichen Manövern auf Hochreibwert und Niedrigreibwert objektiv sowie subjektiv untersucht und diskutiert.

Während die implementierte Vorsteuerung bereits das gewünschte Führungsverhalten des Fahrzeugs realisiert, steigern die geregelten Strukturen die Stabilität des Fahrzeugs im Grenzbereich. So können die Ziele an das Fahrverhalten, insbesondere eine signifikante Verbesserung der Fahrstabilität und der Agilität, subjektiv wie objektiv mit der integrierten Querdynamikregelung erreicht werden.

Abstract

One of the largest industries in Germany is the automotive industry. In particular, German manufacturers enjoy an excellent reputation and play a major role in worldwide markets. In order to maintain this position, their automobiles are continuously further developed. In the chassis development, the focus lies especially on driving security, drive comfort and driving pleasure. As passive chassis systems are limited in their capabilities, active chassis systems are increasingly employed. Examples are active front and rear steering systems and torque vectoring differentials. Considering the lateral dynamics control, these systems differ in their applicable tasks and range of applications. By combining these active chassis systems, over-actuated vehicles are created. Thus, more control-variables of the active chassis systems are available than needed for the realization of the desired vehicle motion. The resulting degrees of freedom for the control algorithm bring up the question, which chassis system should be used at what conditions.

In this thesis, an integrated lateral dynamics control system for an over-actuated vehicle equipped with an active superposition steering at the front axle, a rear wheel steering, a torque-vectoring differential and wheel individual brakes is investigated.

Therefore, a concept is being developed, which controls the lateral dynamics of the vehicle up to the adhesion limit and optimally distributes the control-variables of the systems. In addition, it also estimates the driving state as well as the friction-coefficient for the control, which are necessary for an application in a series car. The presented concept is validated with simulations and investigated using experimental vehicle test drives.

First, a simulation model with 14 degrees of freedom is presented and validated, which is able to emulate the dynamics of a vehicle close to reality. Under consideration of the most important chassis effects, a reduced driving dynamics model with three degrees of freedom is derived and validated as well.

This reduced model is then used in combination with a Kalman filter for the state and friction-estimation. An estimation concept is presented, which takes realistic constraints like inclination and bank angles, hilltops and sinks, changing road friction conditions and maneuvers up to the adhesion limit into account, using only sensors available in present vehicles. The algorithms needed for the implementation in a series car are discussed and the state and friction-estimation concept is validated using real measurement data of the test vehicle.

Subsequently, a new concept for the integrated lateral dynamics control system is proposed, which is feasible in a vehicle. This concept includes an online trajectory-generation algorithm, which uses the driver's commands in order to generate an appropriate and reachable desired vehicle behavior under consideration of the actual estimated friction coefficient. Suitable configuration parameters are presented, which enable the direct parametrization of important lateral dynamics vehicle properties like the steering wheel effort or the self-steering behavior.

The desired vehicle behavior is realized by using a feed-forward control, an output feedback control as well as an optimization of the control-variables. For the latter, a method is presented, which realizes an optimal inversion of the reduced driving dynamics model and in addition

considers actuator constraints. For this purpose, a convex optimization problem is derived and solved in real-time.

The integrated lateral dynamics control algorithm is realized in three different structures. First, a feed-forward control, second, a feedback control using the actual vehicle state or the estimated vehicle state of the kalman filter for the state parametrization of the optimization algorithm and third, a feedback control using the desired vehicle state for the state parametrization of the optimization algorithm.

These three structures are validated in the simulation and their properties are discussed. Subsequently, the structures are implemented in a test vehicle and objectively as well as subjectively tested and discussed with different maneuvers on high and low friction surfaces.

The feed-forward control can already realize the desired vehicle transfer behavior. Additionally, the controlled structures increase the stability of the vehicle at the adhesion limits. It is possible to state, that the objectives relating to driving behavior, especially a significant improvement of the driving stability and agility, can be achieved by use of the integrated lateral dynamics control algorithm subjectively as well as objectively.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	13
1.1	Zielsetzung der Arbeit	15
1.2	Literaturübersicht	16
1.2.1	Fahrdynamikregelung überaktuierter Fahrzeuge	18
1.2.2	Zustands- und Reibwertschätzung	23
1.3	Aufbau der Arbeit	28
2	Modellierung	29
2.1	Simulationsmodell	29
2.1.1	Freiheitsgrade	29
2.1.2	Modellgleichungen	30
2.1.3	Reifenmodellierung	39
2.1.4	Geschwindigkeitsregelung	41
2.2	Vereinfachtes Fahrdynamikmodell	45
2.2.1	Auswahl geeigneter Freiheitsgrade und Modellierungstiefe	45
2.2.2	Modellgleichungen	48
2.2.3	Reifenmodellierung	52
2.3	Aktuatormodellierung	55
2.3.1	Überlagerungslenkung	56
2.3.2	Hinterachslenkung	57
2.3.3	Torque-Vectoring Differential	59
2.3.4	Radindividuelles Bremssystem	60
2.4	Validierung der Modelle	62
2.4.1	Fahrmanöver	62
2.4.2	Versuchsfahrzeug und Messtechnik	63
2.4.3	Validierungsergebnisse	64
3	Zustands- und Reibwertschätzung	69
3.1	Konzeption	70
3.1.1	Modellierung	72
3.1.2	Beobachtbarkeitsanalyse	75
3.1.3	Kalman Filter	79
3.2	Implementierung	83
3.2.1	Abtastzeit und Numerische Integration	83
3.2.2	Berechnung der Längsgeschwindigkeit anhand der Raddrehzahlen	83
3.2.3	Adaption des Kalman Filters	85
3.2.4	Schätzung des dynamischen Radhalbmessers	88
3.2.5	Überprüfung der Qualität des GPS-Signals	90
3.2.6	Algorithmus zur Bestimmung des Reibwert-Eingangs	91

3.3	Validierung der Zustands- und Reibwertschätzung	92
3.4	Diskussion der Ergebnisse	99
4	Integrierte Querdynamikregelung	101
4.1	Konzeption	101
4.1.1	Analyse des vereinfachten Fahrdynamikmodells	101
4.1.2	Regelungskonzept	104
4.2	Berechnung des Wunschfahrverhaltens	109
4.2.1	Fahrdynamische Zielgrößen	109
4.2.2	Online Trajektoriengenerierung	110
4.2.3	Parameter für die Abstimmung	114
4.2.4	Berechnung der Führungsgröße für den Regler	117
4.3	Stellgrößenoptimierung	119
4.3.1	Problemstellung	119
4.3.2	Algorithmus	119
4.3.3	Implementierung	122
4.3.4	Validierung	123
4.4	Ausgangsrückführung	125
4.5	Implementierung	127
4.5.1	Glättung des geschätzten Reibwertes	127
4.5.2	Glättung der Längsbeschleunigung	129
4.5.3	Schätzung der vertikalen Zentrifugalbeschleunigung	130
4.5.4	Kompensation der Aktuatordynamik	131
5	Validierung der integrierten Querdynamikregelung	133
5.1	Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen	133
5.1.1	Aufbau der Simulationsumgebung	133
5.1.2	Simulation der Fehlerdynamik und eines Lenkradwinkelsprungs mit einem reduzierten Reibwert an der Hinterachse	134
5.1.3	Simulation eines Handlingkurses auf trockener Straße	138
5.1.4	Untersuchung des linearen Übertragungsverhaltens	141
5.2	Validierung des Konzeptes zur integrierten Querdynamikregelung im Versuchsfahrzeug	143
5.2.1	Implementierung und Parametrierung im Versuchsfahrzeug	143
5.2.2	Parametrierung der integrierten Querdynamikregelung im Versuchsfahrzeug	144
5.2.3	Subjektive Erfahrungen im Fahrzeug und Auswahl der gezeigten Ergebnisse	145
5.2.4	Versuchsergebnisse auf trockener Fahrbahn	147
5.2.5	Versuchsergebnisse auf schneebedeckter Fahrbahn	153
5.2.6	Kombination beider Strukturen	159
5.2.7	Subjektive Versuchsergebnisse auf schneebedeckter Fahrbahn	160
6	Zusammenfassung und Ausblick	165
6.1	Zusammenfassung	165
6.2	Ausblick	168
A	Anhang	169
A.1	Modellierung	169

A.2 Zustands- und Reibwertschätzung	169
A.3 Integrierte Querdynamikregelung	173
A.4 Validierung im Versuchsfahrzeug	178
Abbildungsverzeichnis	181
Abkürzungsverzeichnis	185
Literaturverzeichnis	193