Schriftenreihe
des Instituts für
Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Nr: 74

M.Sc.
Christian Wagner
2021

Methoden zur prüfstandsbasierten Lenkungsabstimmung

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Methoden zur prüfstandsbasierten Lenkungsabstimmung

Bei der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von:	Christian Wagner
geboren in:	Bad Saarow-Pieskow

eingereicht am:	26.11.2020
mündliche Prüfung am:	02.07.2021

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay
	Prof. Dr. Ludger Frerichs

2021

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 74

Christian Wagner

Methoden zur prüfstandsbasierten Lenkungsabstimmung

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8240-1
ISSN 1619-6325

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Beim Direktor des Instituts Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay und Oberingenieur apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze bedanke ich mich für die Unterstützung und die notwendigen Freiheiten, das vorliegende Forschungsvorhaben zu erarbeiten und erfolgreich abzuschließen.

Zudem gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Ludger Frerichs, Leiter des Instituts für Mobile Arbeitsmaschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Zweitgutachtens. Vielen Dank auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig, für die Annahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Ich bedanke mich bei allen mitwirkenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugtechnik, dem Technikum, dem Sekretariat sowie meinem ehemaligen Team an Studierenden, auf die ich mich stets verlassen konnte. Dabei gilt mein besonderer Dank für die Unterstützung rund um die Aktivitäten am Lenkungs-HiL-Prüfstand Frederik Achilles, Jonas Drößler sowie allen anderen beteiligen studentischen Hilfskräften.

Mein Dank richtet sich auch an mein familiäres und privates Umfeld. Besonders großer Dank geht an meine Eltern, Anke und Ralf Wagner, die mich während meiner gesamten Ausbildung bis hin zur Fertigstellung dieser Arbeit stets unterstützt haben und jederzeit an meiner Seite standen. Meinem Großvater Dr. Horst Wagner möchte ich danken, da er mich dahingehend bestärkt hat, nach dem Abitur ein Maschinenbaustudium zu beginnen.

Der schlussendlich größte und wichtigste Dank gilt meiner Freundin Eva Christina Blossei, die mir mit viel Verständnis und Nachsicht den Rücken freigehaltenen hat und immer mit einem offenen Ohr an meiner Seite stand. Ohne deine liebevolle und unermüdliche Unterstützung wäre dies nicht möglich gewesen!

Methoden zur prüfstandsbasierten Lenkungsabstimmung

von:	Christian Wagner
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay
	Prof. Dr. Ludger Frerichs

Kurzfassung

Um sich in der stetig wachsenden Globalisierung behaupten zu können, gilt es für die Automobilindustrie neue Fahrzeuge in kürzeren Entwicklungszyklen auf den Markt zu bringen. Hierfür streben die Original-Equipment-Manufacturers (OEM) eine virtuelle Fahrzeugentwicklung an, in der notwendige Fahrzeug- oder Komponententests durch Simulationen oder Prüfstandsversuche ersetzt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zwei Methoden zur virtuellen Abstimmung von Lenksystemen entwickelt. Ziel ist es, mittels dieser Methoden definierte markentypische Lenkverhalten erzeugen zu können. Hierfür werden zunächst die mechanischen Bauarten von elektromechanischen Lenksystemen vorgestellt. Dazu wird die Funktionsweise der gängigen Software zur bedarfsgerechten Regelung detailliert beschrieben. Hauptbestandteil der Software sind die Lenkfunktionen *Lenkkraftunterstützung* und *Aktiver Rücklauf*. Anschließend erfolgt die Betrachtung virtueller Methoden, die in der Lenkungsentwicklung Anwendung finden. Im Rahmen dessen wird dargelegt, dass in der Analyse von Lenkungen prüfstandsbasierte Methoden klare Vorteile gegenüber simulativen Methoden aufweisen. Beispielsweise werden am Prüfstand die nichtlinearen Systemeigenschaften der Lenkung mit einbezogen. Weiterhin wird das konservierte markentypische Lenkverhalten nach Schaare[1] vorgestellt, welches auf rein objektiven Kennparametern basiert.

Zudem wird der für diese Arbeit verwendete Lenkungs-HiL-Prüfstand zur Erhebung der Messdaten vorgestellt. Die mit dem Prüfstand verbundene Fahrdynamiksimulation beruht auf einem Einspurmodell und ermittelt die Fahrzustandsgrößen, sowie die wirkenden Kräfte in den simulierten Manövern. Die Validierung des Modells erfolgt mittels realer Fahrzeugmessungen. Für die Vergleichsmessun-

[1] SCHAARE, DENNIS: *Identifikation und Konservierung eines markentypischen Lenkgefühls*. Doktorarbeit, TU Braunschweig, 2017

gen wird das selbe Lenksystemen verwendet, um das Fahrzeugmodell bestmöglich auszulegen.

Anschließend werden die aus vorheriger Forschung identifizierten 13 Kennparameter des markenypischen Lenkverhaltens vorgestellt und ein Lenkungsfingerprint für die spätere Verwendung definiert. Dieser wird einer ausführlichen Sensitivitätsanalyse unterzogen. Die Ergebnisse zeigen auf, wie stark sich die einzelnen Kennparameter durch Lenkfunktionen beeinflussen lassen. Daran anschließend werden die Methoden zur prüfstandsbasierten Abstimmung erarbeitet. Ziel ist es, durch Veränderung von Lenkfunktionen den definierten markentypischen Fingerprint zu erreichen. Hierfür werden zwei unterschiedliche Methoden genauer erarbeitet. Die Online-Optimierung sieht vor, ein Optimierungsverfahren direkt in den Prüfstandablauf zu integrieren. Dadurch wird das Lenkverhalten nach einer Messung objektiv bewertet, die Abweichung zum Sollverhalten bestimmt und ein neuer Parametersatz erzeugt. Die Offline-Optimierung nutzt die Methode der statistischen Versuchsplanung. Diese erhebt eine Datenbasis, die es ermöglicht, empirische Modelle zur Beschreibung des Systemverhaltens zu erzeugen. Diese wiederum ermöglichen die Identifizierung eines bestmöglichen Parametersatzes, um den Fingerprint zu rekonstruieren.

Abschließend werden die erarbeiteten Methoden in Prüfstandsversuchen angewendet. Die Ergebnisse bestätigen, dass es mittels prüfstandsbasierter Methoden möglich ist, einen Fingerprint auf ein Lenksystem zu prägen. Somit kann die vorliegende Forschungsarbeit den aktuellen Stand der Technik durch Methoden zur prüfstandsbasierten Lenkungsabstimmung erweitern. Dies stellt einen wesentlichen Schritt für die virtuelle Fahrzeugentwicklung dar.

Methods for test bench-based steering application

by:	Christian Wagner
Chair:	Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Experts:	Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay
	Prof. Dr. Ludger Frerichs

Abstract

The automotive industry has to develop new vehicles in shorter development cycles, due to the growing globalization. For this purpose, the Original Equipment Manufacturers (OEM) strive for virtual vehicle development which replaces necessary vehicle or component tests by simulations or test bench tests.

This work outlines two methods for virtual application of steering systems. The aim is to be able to generate a defined brand-typical steering behaviour using virtual methods. First, the mechanical types of electro-mechanical steering systems are presented. Then, the functioning of the common software for demand control is described in detail. The main components of the software are the steering functions SteeringSupport and ActiveReturn. Following, the chapter lists virtual methods that are used in steering development. Test bench-based methods have advantages over simulative methods in the analysis of steering systems. For example, the test bench includes the non-linear system properties of the steering. Furthermore, the preserved brand-typical steering behaviour based on objective parameters according to Schaare[2] is presented.

In addition, this work presents the steering HiL test bench to collect the measurement data. The driving dynamics simulation connected to the test bench is based on a single-track model and determines the driving state variables as well as the forces acting in the simulated maneuvers. The model is validated using real vehicle measurements. The same steering system is used for the comparative measurements in order to design the vehicle model in the best possible way.

Then, the 13 parameters of the brand-typical steering behaviour identified from previous research are presented and a steering fingerprint is defined for later use. This is subjected to a detailed sensitivity analysis. The results show that the steering functions have a strong impact on individual parameters. Furthermore, the

[2] SCHAARE, DENNIS: *Identifikation und Konservierung eines markentypischen Lenkgefühls.* Doktorarbeit, TU Braunschweig, 2017

methods for test bench-based application are developed. The aim is to achieve the defined brand-typical fingerprint by changing steering functions. Two different methods are developed for this purpose. The Online-Optimization integrates an optimization method to the test bench process. As a result, the process evaluates the steering behaviours after a measurement, by determining the deviation to the target. Afterwards, the algorithm generates a new parameter set. The Offline-Optimization uses the Design of Experiment method. This collected database is used to generate empiric models, which describe the steering system behaviour. In order to reconstruct the steering fingerprint the optimization algorithm identifies the best possible parameter set. Finally, the methods developed are applied in test bench tests. The results confirm that it is possible to use test bench-based methods to enable a steering system to adobt the fingerprint. This research work can thus expand the current state of the art by methods for test bench-based steering application. This represents an essential step forward for the virtual vehicle development.

Inhalt

Formelzeichen und Abkürzungen **iii**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation und Zielsetzung 2
1.2 Aufbau der Arbeit 5

2 Stand der Forschung **7**
2.1 Lenksysteme 7
2.1.1 Aufbau Lenksysteme 7
2.1.2 Elektromechanische Lenksysteme 9
2.2 Lenkfunktionen 11
2.2.1 Regelungsansätze 16
2.3 Virtuelle Methoden in der Lenkungsentwicklung 17
2.3.1 Simulationsbasierte Methoden 17
2.3.2 Simulatorbasierte Methoden 20
2.3.3 Hardware-in-the-Loop Prüfstand 22
2.4 Objektives Lenkverhalten 26
2.4.1 Definition des Lenkgefühls 27
2.4.2 Objektivierung des Lenkgefühls 29
2.4.3 Beispiele zur Objektivierung des Lenkgefühls 36
2.4.4 Markenspezifisches Lenkverhalten 38
2.5 Zusammenfassung und Handlungsbedarf 40

3 Lenkungs-HiL-Prüfstand **43**
3.1 Aufbau und Funktionsweise 43
3.2 Fahrzeugmodell 46
3.2.1 Einspurmodell 47
3.2.2 Validierung des Einspurmodells 51

4 Sensitivität des objektiven Lenkverhaltens durch Hardware- und Softwareänderungen **55**
4.1 Objektives Ziellenkverhalten 55
4.2 Einfluss von Hardwareeigenschaften 67

4.3 Einfluss von Softwareänderungen 71

5 Methoden zur prüfstandsbasierten Lenkungsabstimmung 75
5.1 Grundlagen der Optimierung 76
5.1.1 Problemstellung einer Optimierung 77
5.1.2 Nichtlineare Optimierungsverfahren 80
5.2 Definition der Problemstellung 85
5.2.1 Auswahl des Optimierungsverfahrens 87
5.2.2 Partikelschwarm-Optimierung 89
5.2.3 Nelder-Mead Verfahren 92
5.3 Parametrierung der Lenkfunktionen 95
5.3.1 Approximation 97
5.3.2 Bewertung der Approximationsmodelle 98
5.3.3 Sensitivität der Approximationsmodelle 100
5.4 Online-Optimierung 108
5.5 Offline-Optimierung 109
5.5.1 Erstellung des Versuchsplans 111
5.5.2 Empirische Modelle 112
5.5.3 Identifizierung der optimierten Applikationswerte 115

6 Ergebnisse der prüfstandsbasierten Lenkungsabstimmung 117
6.1 Anwendbarkeit der Optimierung 117
6.1.1 Optimierung einzelner Lenkfunktionen 118
6.2 Kollektive Optimierung 120
6.2.1 Anwendung der Online-Optimierung 121
6.2.2 Anwendung der Offline-Optimierung 122
6.2.3 Vergleich der Optimierungsmethoden 125
6.3 Abstimmung eines neuen Lenksystems 126
6.4 Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse 129

7 Zusammenfassung 131
7.1 Fazit 133

Literaturverzeichnis 135

A Anhang - Sensitivität 145

B Anhang - Bewertung der Startapplikation 149