

Schriftenreihe
Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme
am Institut für Fahrzeugtechnik,
TU Braunschweig



Nr: 7

M.Sc.
Jan Hendrik Sterthoff
2021

Potenziale von Steer-by-Wire Systemen für Lenk- und automatisierte Fahrfunktionen

Herausgegeben von:
apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze

Potenziale von Steer-by-Wire Systemen für Lenk- und automatisierte Fahrfunktionen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Jan Hendrik Sterthoff, M.Sc.
geboren in: Hamm

eingereicht am: 14.12.2020
mündliche Prüfung am: 16.07.2021

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. P. Eilts
Gutachter: apl. Prof. Dr.-Ing. R. Henze
Prof. Dr.-Ing. T. Vietor

Schriftenreihe Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme
am Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig

Band 7

Jan Hendrik Sterthoff

**Potenziale von Steer-by-Wire Systemen für
Lenk- und automatisierte Fahrfunktionen**

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 978-3-8440-8197-8

ISSN 2700-046X

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 Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater, apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze, bedanken, der mir während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter große Freiheiten gewährt hat und mir so das wissenschaftliche Arbeiten, und damit auch diese Dissertation, ermöglichte. In gleichem Maße gebührt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, Direktor des Instituts für Fahrzeugtechnik, für die zahllosen fachlichen Gespräche und das entgegengebrachte Vertrauen.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor, Leiter des Instituts für Konstruktionstechnik der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für die Betreuung als Gutachter meiner Dissertation. Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsverfahren.

Ich danke allen Kollegen, im Büro sowie der Werkstatt, für eine Zeit, die ich rückblickend nicht nur als lehrreich, sondern auch als angenehm und schön in Erinnerung behalten werde. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Felix Tigges, Björn Reuber und Holger Znamiec, die für mich von Bürokollegen über die Jahre zu echten Freunden geworden sind und zudem durch ihren fachlichen Rat an etlichen Stellen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Der letztlich größte Dank gebührt jedoch meinem familiären Umfeld. Meinen Eltern, die mich seit Kindestagen in allen Lebenslagen unterstützt haben, bin ich unendlich dankbar. Ebenso dankbar bin ich meiner Frau Rebecca, die stets an mich und das Gelingen dieser Arbeit geglaubt hat, selbst als ich gezweifelt habe.

Braunschweig, 7. August 2021

Kurzfassung

In Verbindung mit der weiter fortschreitenden Fahrzeugautomatisierung rücken Steer-by-Wire (SbW) Systeme vermehrt in den Fokus der Entwicklung. Aufgrund der rein elektrischen Signalübertragung zwischen Lenkrad und Lenkgetriebe besitzen diese Systeme gegenüber konventionellen Lenksystemen erhebliche Potenziale für die Entwicklung neuer Funktionen. In diesem Kontext ist das vorrangige Ziel dieser Dissertation die Bewertung von neuartigen Funktionen für Steer-by-Wire Systeme.

Untersucht wird zunächst eine Funktion zur Modifikation des Rückmeldeverhaltens von Lenksystemen am Beispiel eines „Reibwertsprungs“. Im Rahmen einer umfangreichen Studie an einem dynamischen Gesamtfahrzeugsimulator können diesbezüglich zwei grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden: Die Rückmeldung einer Nutzinformation, wie dem Reibwertsprung, kann durch zusätzliche Momente am Lenkrad auf eindeutig unterscheidbare Niveaus eingestellt werden. Ferner lässt sich anhand der Probandenurteile ein Richtwert für die optimale Intensität der Rückmeldung einer Reibwertänderung ableiten.

Im anschließenden Teil der Arbeit wird zur Verbesserung der Handlingeigenschaften eines Pkw eine variable Lenkübersetzung für SbW Systeme entwickelt. Durch ein Konzept, in dem Fahrgeschwindigkeit, Lenkradwinkel und -geschwindigkeit sowie Quer- und Längsbeschleunigung berücksichtigt werden, lassen sich die Handlingeigenschaften weitreichend modifizieren. Es ist auf diese Weise möglich, zugleich die Agilität des Fahrzeugs, das Steuerverhalten in Form der Linearität und der Ankündigung des Grenzbereichs sowie das dynamische Verhalten, charakterisiert durch Parameter im Frequenzgang der Gierverstärkung, zu optimieren. Anhand ausgewählter Kennparameter lässt sich die Wirkung der variablen Lenkübersetzung quantifizieren und objektiv bewerten.

Im dritten Abschnitt der Arbeit wird ein Modus mit einem stillstehendem Lenkrad für automatisierte Fahrzeuge implementiert und in einer weiteren Studie untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einem stillstehenden Lenkradmodus der Komfort für den Fahrer erhöht werden kann, sich jedoch die Mehrheit der Fahrer mit einem mitdrehenden Lenkrad etwas sicherer fühlt. Bei Verwendung des stillstehenden Lenkrads wird während der Übergabe der Fahraufgabe vom automatisierten Fahrzeug an den Fahrer eine Synchronisierung zwischen den in der Kurve eingeschlagenen Vorderrädern und dem Lenkrad notwendig. Zu diesem Zweck werden verschiedene Synchronisierungsvarianten entwickelt und getestet. In zwei untersuchten Situationen können zielführende Varianten auf Basis von Probandenurteilen identifiziert und darüber hinaus durch objektive Parameter aus Messdaten belegt werden.

Abstract

In the context of the ongoing advances in vehicle automation, Steer-by-Wire (SbW) systems are becoming more and more a focus of R&D. Due to the electrical signal transmission between the steering wheel and the steering rack, these systems offer great potential for the development of new steering functions in comparison to conventional systems. Against this background, the aim of this dissertation is the evaluation of new functions for Steer-by-Wire systems.

First, a function for the modification of the feedback behavior of a steering system is investigated by the example of a sudden change of road friction at the front wheels. Based on a comprehensive study using a dynamic driving simulator, two basic findings can be obtained: The feedback of beneficial information, such as the sudden change of road friction, can be adjusted to clearly distinguishable levels through the application of additional torque at the steering wheel. Furthermore, the test person's ratings can be used to derive a recommended value for the ideal intensity of the feedback of a change in road friction.

In the following section of the thesis, a variable steering ratio for SbW systems is developed to improve the handling characteristics of a passenger car. The handling properties can be extensively modified by a concept in which driving speed, steering wheel angle and rate as well as lateral and longitudinal acceleration are considered. In this way it is possible to simultaneously optimize the agility of the vehicle, the steering behavior in form of linearity and notification of the lateral limit as well as the dynamic behavior, characterized by parameters in the frequency response of yaw gain. Using a set of selected characteristic parameters, the effect of the variable steering ratio can be quantified and evaluated objectively.

In the third part of the thesis, a stationary steering wheel mode for automated vehicles is implemented and analyzed in a further study. The results show that the driver's comfort can be increased with a stationary steering wheel mode, but that the majority of drivers feels safer with a rotating steering wheel. When using the stationary steering wheel mode, a synchronization between the front wheels (which are turned when cornering) and the steering wheel is necessary during the handover of the driving task from the automated vehicle to the driver. For this purpose, different synchronization options are developed and tested. In two investigated situations, promising options can be identified on the basis of test person's ratings and can also be confirmed by objective parameters from measurement data.

Inhaltsverzeichnis

Formel- und Abkürzungsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Steer-by-Wire Systeme – Grundlagen	5
2.1 Entwicklung der Lenksysteme	5
2.2 Systemaufbau und Redundanzen	6
3 Stand der Forschung	11
3.1 Abbildung des Lenkgefühls	11
3.2 Darstellung von Nutzinformatio- nen in der Lenkung	13
3.3 Funktionen zur Verbesserung von Stabilität und Fahreigenschaften	15
3.4 Lenkung im Kontext des automati- sierten Fahrens	19
3.5 Zusammenfassung und Einord- nung der Arbeit	22
4 Modifikation des Rückmeldeverhaltens	25
4.1 Studie zur modifizierten Rück- meldung von Nutzinformatio- nen	25
4.1.1 Gesamtfahrzeugsimulator	25
4.1.2 Grundlagen der Fahrsimulator- studie	27
4.1.3 Versuchsablauf und Szenarien	29
4.1.4 Auswertung der Befragung	31
4.1.5 Auswertung der Messdaten	35
4.2 Unterscheidbarkeit des Fahr- bahnreibwertes	38
4.2.1 Analyse von Zahnstangen- kraftmessungen	39
4.2.2 Exemplarische Anwendung zur Klassifikation	41
4.3 Fazit	44
5 Konzept einer variablen Lenk- übersetzung für Steer-by-Wire	45
5.1 Fahrzeughandling und Kenn- parameter	45

5.2	Zweispursimulationsmodell	49
5.3	Steer-by-Wire Modell	52
5.3.1	Physikalische Modellbildung des SbW Systems	53
5.3.2	Modellvalidierung	56
5.4	Aufbau der variablen Lenkübersetzung	59
5.4.1	Teilfunktionen der variablen Lenkübersetzung	60
5.4.2	Gesamtstruktur der variablen Lenkübersetzung	61
5.5	Optimierungsprozess	62
5.5.1	Zielverhalten	63
5.5.2	Optimierungsverfahren	65
5.6	Darstellung der Optimierungsergebnisse	67
5.7	Beurteilung der Ergebnisse in verschiedenen Manövern	70
5.8	Fazit	74
6	Stillstehendes Lenkrad im automatisierten Fahrzeug	77
6.1	Grundlagen der Fahrimulatorstudie	77
6.1.1	Darstellung der Stichprobe	77
6.1.2	Randbedingungen und Störeinflüsse	78
6.2	Stillstehender Lenkradmodus	79
6.2.1	Versuchsablauf und Szenarien	79
6.2.2	Fragestellungen	81
6.2.3	Auswertung der Befragung	82
6.3	Übergabestrategien mit einem stillstehenden Lenkrad	86
6.3.1	Versuchsablauf und Szenarien	86
6.3.2	Fragestellungen	91
6.3.3	Auswertung der Befragung	91
6.3.4	Auswertung der Messdaten	94
6.4	Diskussion und Anwendbarkeit	99
7	Zusammenfassung	105
A	Anhang	121