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



Nr: 9

Dipl.-Ing.
Thorsten Meister
2022

Entwicklung prädiktiver Fahrfunktionen mit Hilfe der 3F-Methodik

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

Entwicklung prädiktiver Fahrfunktionen mit Hilfe der 3F-Methodik

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

von

Thorsten Meister

geboren in Hannover

eingereicht am:	04.03.2021
mündliche Prüfung am:	03.11.2021
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. T. Vietor
Gutachter:	apl. Prof. Dr.-Ing. R. Henze
	Prof. Dr.-Ing. habil. G.-P. Ostermeyer

2022

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

Band 9

Thorsten Meister

Entwicklung prädiktiver Fahrfunktionen mit Hilfe der 3F-Methodik

Shaker Verlag
Düren 2022

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 2022
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8547-1
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

Diese Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig entstanden. Mein besonderer Dank gilt apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze, Leiter des Teams Fahrzeugdynamik und aktive Systeme, für die Betreuung der Arbeit, das entgegengebrachte Vertrauen und die gewährten Freiheiten. Zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, dem Leiter des Instituts, haben mich beide fachlich wie persönlich in sämtlichen Aktivitäten und bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt. Darüber hinaus möchte ich mich bei beiden ganz herzlich für die Möglichkeiten bedanken, an vielen Stellen meinen Horizont erweitern zu können sowie für die vielen unvergesslichen Dienstreisen und Events. Außerdem danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer, Direktor des Instituts für Dynamik und Schwingungen, für die Übernahme der Mitberichterstattung sowie Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor, Direktor des Instituts für Konstruktionstechnik, welcher den Vorsitz im Promotionsausschuss übernommen hat.

Mein Dank gebührt allen derzeitigen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugtechnik für die freundliche Aufnahme, Unterstützung und rege Quelle fachlicher Diskussionen. Weiterhin ist auch das Engagement der Werkstatt anzuerkennen, die mich unter der Leitung von Maic Rennebach in den zahlreichen Projekten von der Konzeptionierungs- bis zur Umsetzungsphase der Versuchsträger sowie bei der technischen Begleitung während der Erprobungsdurchführung tatkräftig unterstützt haben. Ein großes Dankeschön an dieser Stelle gilt Daniel, Jaron, Katharina, Lars, Manni und Olli.

Für die Unterstützung bei Themen der Verwaltung und Organisation gilt mein Dank dem Sekretariat, vertreten durch Kathrin Durner und Sylvie Rohde-Schulte. Weiterhin danke ich den Kollegen meines Büros, insbesondere Bodo Schönemann, Christoph Nippold, Waldemar Jarisa und Maximilian Flormann, für die beständige sehr gute fachliche Zusammenarbeit und die freundschaftlichen Gespräche abseits des Arbeitsalltags.

Ein zentrale Rolle während meiner Zeit am Institut sowie im Erstellungsprozess und Abschluss dieser Arbeit spielte mein Team von Studierenden. Trotz vorhersehbarer Wechsel und Abgänge konnte die Stärke, der Teamgeist und die Freude am Thema über die Studierendengenerationen weitervermittelt und erhalten werden. Dazu haben maßgeblich Philipp Bock, Lukas Sagan und Lucas Greiner-Fuchs als organisatorische Bindeglieder des Teams beigetragen. Die Gruppe zur Betreuung und Organisation der Feldstudien im Realverkehr rund um Mirac Üster und René Slabon war auch über die üblichen Arbeitszeiten hinaus fortwährend sehr engagiert und hatte stets ein offenes Ohr für anfallende Aufgaben. Hierfür möchte ich mich bei euch und dem Kreis aller Beteiligten bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meinem Vater, meinen Freunden und Kollegen, die sich am abschließenden Korrekturlesen dieser Arbeit beteiligt haben.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Frau Wiebke und unserer Familie bedanken, die mich in allen Lebenslagen persönlich unterstützte und auch den ein oder anderen Motivationsschub auslöste. Die vergangenen Jahre, in denen diese Arbeit entstanden ist, waren sehr intensiv, sodass ich insbesondere unter der Woche wenig Zeit hatte. Das dafür entgegengebrachte Verständnis und die Abnahme alltäglicher Aufgaben haben mir sehr geholfen, die Bausteine der Arbeit auszugestalten. Vielen Dank!

Thorsten Meister

Braunschweig, 24. März 2022

Kurzfassung

Mit stetig in Umfang und Komplexität zunehmenden Funktions- und Vernetzungsgrad wandeln sich Fahrzeuge immer mehr zu rollenden Rechenzentren. Die Ausleitung der dort entstehenden Daten ist mit unterschiedlichem Fokus und Intensität sowohl in Phasen der Produktentwicklung als auch während der Produktnutzung durch den Kunden von hoher Wichtigkeit. Die im Rahmen von Testfahrten, Feldtests oder durch ein vernetztes Auto, welches sich mit anderen Diensten und Geräten verbindet, generierten Datenmengen nehmen viel Kapazität auf Servern ein. Die Daten adäquat nutzen zu können und diese damit zu einem elementaren Baustein der Wertschöpfung werden zu lassen, ist die Aufgabe einer zielorientierten Analyse. Das hohe Interesse in der Automobilindustrie ist darin begründet, die gewonnenen Erkenntnisse trotz verkürzter Entwicklungszeiten und Produktlebenszyklen möglichst flexibel und schnell in den gewohnten Arbeitsabläufen zu berücksichtigen. Um diese Herausforderungen zu bewältigen sind zukünftig geeignete Vorgehensweisen notwendig, welche es bspw. mittels datengetriebenem Ansatz ermöglichen, die Funktionsentwicklung und -applikation zu verbessern.
Vor diesem Hintergrund wird innerhalb dieser Arbeit eine Methodik vorgestellt, die eine gezielte Nutzung von Flottendaten ermöglicht, um basierend auf den erlangten Erkenntnissen eine Assistenzfunktion zur vorausschauenden Geschwindigkeitsanpassung weitestgehend automatisiert auszulegen. Die organisierten und durchgeführten Feldtests über mehrere Jahre hinweg führten zu einer umfangreichen Messdatenbank mit einer Vielzahl unterschiedlichster Signale der Fahrzeugdynamik, Komforteigenschaften und Umfelderfassung. Für die entsprechende Aufbereitung der Daten, deren Verwaltung sowie die Extraktion der Zielparameter für die Geschwindigkeitsregelung, welche ein vom Fahrer abgeleitetes Verhalten in ausgewählten Fahrmanövern reflektieren, wird eine durchgängige Werkzeugkette entwickelt. Die gewonnenen Muster dienen als Grundlage des simulationsbasierten Funktionsentwicklungsansatzes. Um dieses Wunschverhalten abbilden zu können, wird in einer aufgebauten virtuellen Testumgebung der Abstandsregeltempomat des Versuchsfahrzeugs um eine modellbasiert entwickelte prädiktive Geschwindigkeitsregelung erweitert. Im simulierten Fahrversuch wird diese Funktion innerhalb der festgelegten Manöver getestet und mit Hilfe einer geschaffenen Testautomatisierung sowie eines darin enthaltenen Optimierungsverfahrens angepasst. Innerhalb dieses Applikationsprozesses werden die idealen Reglerparameter für drei verschiedene Fahrmodi anhand definierter Sollvorgaben ermittelt. Parallel dazu wird ein Konzept zur Visualisierung der Funktion entworfen und sowohl in der Simulation als auch im Demonstrationsfahrzeug umgesetzt. Abschließend wird die optimierte Funktion in drei unterschiedlich ausgeprägten Modi während einer Probandenstudie von Fahrern auf der Landstraße getestet und beurteilt. Innerhalb des Teilnehmerkreises lag wenig Erfahrung mit vergleichbaren, bereits in Serien eingesetzten Systemen vor. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die gewählten Varianten eine hohe Performance aufweisen und damit auf eine breite Akzeptanz bei den Anwendern stoßen.
Folglich wird dargelegt, dass die entworfene Methodik ein probates Mittel zur effizienten Erlangung über Kenntnisse einer potentiellen Funktionsauslegung darstellt. Jene kann bereits zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess eingesetzt werden. Die erzielten Ergebnisse und Nutzerrückmeldungen untermauern die hohe qualitative Güte der abgestimmten Regelungsparameter des Systems.

Abstract

With in scope and complexity steadily increasing functions and connectivity vehicles convert more and more into data centers on wheels. The transfer of the resulting data is of great importance with different focus and intensity in phases of product development and during product use by the customer. The amount of data in the context of test drives and field tests or by connected cars, which establish a connection to other services and devices, generated take much capacity on servers. In order to be able to use the data adequately and thus make it an elementary component of value creation, a goal-oriented analysis is required. The high level of interest in the automotive industry is based on the fact that the knowledge gained can be taken into account as quickly and flexibly as possible in the usual workflow despite shorter development times and product life cycles. In order to cope with these challenges, suitable procedures will be necessary in the future, for example using a data-driven approach to improve function and application development.

For this purpose, a methodology is presented in this thesis that enables the targeted use of fleet data to obtain different insights. Extracted results are used to mostly automatically design a driver assistance system for predictive speed adjustment. The organized and conducted field tests over several years led to an extensive measurement database with a large number of different signals of the vehicle dynamics, comfort systems and environment perception. A consistent tool chain is being developed to process the data accordingly. This includes the data management and the extraction of the target parameters for the predictive cruise control, which reflect a behavior derived from the driver in selected driving maneuvers. The samples obtained serve as the fundament for the simulation-based function development approach. In order to be able to map this desired behavior within a virtual test environment, the adaptive cruise control of the test vehicle is expanded to include a model-based predictive cruise control system. In the simulated test drive, this function is tested within the specified maneuvers and adapted with the help of a test automation system including an optimization algorithm. Within this application process, the ideal controller parameters for three different driving modes are determined based on defined target values. Furthermore, a concept for the visualization of the function is designed and implemented both in the simulation and in the demonstration vehicle. Finally, the optimized function is tested and assessed in three different modes during a test subject study by drivers on rural roads. Within the group of participants, there was little experience with comparable systems already used in production vehicles. The results generated show that the selected variants have a high performance and are therefore widely accepted by customers.

Against this background, it can be seen that the designed methodology reflects an effective way to efficiently obtain knowledge of a potential functional design from a database that can be used at an early stage in the development process. The results achieved and user feedback underline the high quality of the control parameters of the system.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis **XI**

Symbolverzeichnis **XV**

1 Einleitung **1**
1.1 Hintergrund und Zielsetzung 2
1.2 Aufbau der Arbeit 3

2 Stand der Technik **5**
2.1 Field Operational Tests 5
2.2 Messdatenerfassung 8
2.3 Datenstrukturen 10
2.4 Big Data 11
2.5 Daten-Haltung und -Zugriff 15
2.5.1 NoSQL Datenbanken 16
2.5.2 Indexierung 17
2.5.3 Batch Processing 18
2.6 Analytische Datenverarbeitung und Visualisierung 18
2.6.1 Data-Mining 19
2.6.2 Maschinelle Lernverfahren 20
2.6.3 Visualisierung 23
2.7 Big Data im automobilen Umfeld 23
2.8 Digitale Karte als vorausschauender Sensor 25
2.8.1 ADASIS-Standard 26
2.9 Einsatzspektrum der digitalen Karte im Fahrzeug 29
2.9.1 Kartenunterstützte Fahrzeugfunktionen 30
2.9.2 Kartengebundene Fahrzeugfunktionen 32
2.10 Funktionsentwicklungsprozess und Applikation 33
2.10.1 Simulation und unterstützende Entwicklungswerkzeuge . . 34
2.10.2 Funktionsabstimmung 35
2.11 Schlussfolgerung 37

3 Gesamtmethodik **39**
3.1 3F-Methodik als Entwicklungswerkzeug 39
3.2 Methodisches Vorgehen 41
3.3 Gültigkeitsbereich der Daten-Wertschöpfungskette 47
3.4 Rahmenbedingungen der Fahrfunktion 48
3.5 Anwendungs- und Entwicklungsumgebung 49

4 Datenakquise und Aufbereitung **51**
4.1 Fahrversuch 51
4.1.1 Messtechnische Ausrüstung 52
4.1.2 Organisation 54
4.1.3 Datentransfer 56

4.2 Datenvorverarbeitung 57
4.2.1 Datenstrukturen und Inventarisierung 57
4.2.2 Geoinformationen 58
4.2.3 Fahrstilerkennung 60
4.3 Messdatenmanagement 62
4.3.1 Filterkriterien 62
4.3.2 Allgemeiner Eindruck 64
4.3.3 Varianten der Datenausgabe 65
4.3.4 Visuelle Datenbetrachtung 67
4.3.5 Statistische Datenanalyse 67
4.4 Messdatenwahl zur Funktionsentwicklung der PGR 69

5 Entwicklung der PCC-Funktion 71
5.1 Reale Testbedingungen 71
5.1.1 Demonstratorfahrzeug 71
5.1.2 Entwicklungsplattform und Messtechnik 73
5.1.3 Fahrumgebung 74
5.2 Simulationsumgebung 75
5.2.1 Fahrzeug mit PCC-Funktion 75
5.2.2 Fahrumgebung 78
5.2.3 Verifizierung des Gesamtmodells 79
5.3 Systemanforderungen 82
5.4 Struktureller Aufbau und Integration der Regelung 86
5.5 Entwurf der prädiktiven Geschwindigkeitsregelung 87
5.5.1 Funktionsweise der Fuzzy-Regelung 87
5.5.2 Struktur der Regelung 90
5.5.3 Neben- und Zusatzfunktionen 92
5.6 Optimierungsmethodik 93
5.6.1 Architektur der Toolkette 93
5.6.2 Manöverkatalog 95
5.6.3 Zielverhalten 96
5.6.4 Optimierung der Fuzzy-Systeme 100
5.7 Funktionsapplikation 103
5.8 Konzept zur Fahrerinformation 106

6 Subjektive Bewertung im Straßenverkehr 109
6.1 Versuchsgestaltung 109
6.1.1 Erprobungsstrecke 109
6.1.2 Probandenpool 110
6.1.3 Varianten 111
6.1.4 Fragebogen 112
6.2 Ergebnisse 113
6.2.1 Bewertung der Systemvarianten 114
6.2.2 Ergänzende Erwartungen und Kommentare 119
6.2.3 Bewertung der Visualisierung 120
6.2.4 Fazit 121

7 Schlussbetrachtung 123
7.1 Zusammenfassung 123
7.2 Ausblick 126

Anhang **129**
A.1 RCP-Modell-Framework 129
A.2 Manöverkollektive 130
A.3 Kennparameter 132
A.4 Zielverhalten 134
A.5 Fragebogen 137