

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



Nr: 8

M.Sc.
Florian Krauns
2022

Automatisiertes Fahren an Stadtkreuzungen

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

Automatisiertes Fahren an Stadtkreuzungen

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Florian Krauns, M.Sc.
aus (Geburtsort): Bielefeld

eingereicht am: 20.05.2021
mündliche Prüfung am: 03.11.2021

Gutachter: apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze
Prof. Dr.-Ing. Georg-Peter Ostermeyer

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

Band 8

Florian Krauns

Automatisiertes Fahren an Stadtkreuzungen

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 978-3-8440-8391-0

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 Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig entstanden. Für die hervorragende fachliche Betreuung der Promotion, aber insbesondere auch für die sehr gute persönliche Unterstützung möchte ich Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay großen Dank aussprechen. Das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheiten, die ich unter anderem bei der Durchführung der Studien für diese Arbeit genießen durfte, weiß ich sehr zu schätzen. Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg-Peter Ostermeyer für die Erstellung des Zweitgutachtens sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Meine ehemaligen Kollegen und Kolleginnen haben einen großen Beitrag dazu geleistet, dass mir die Forschungsarbeit am Institut so viel Freude bereitet hat und ich sie mit der Promotion erfolgreich abschließen konnte. Die gemeinsame Zeit werde ich stets in besonders guter Erinnerung behalten, sei es aufgrund außergewöhnlicher Studien und Versuche, des exzellenten Austauschs bei den Wissenschaftsbesprechungen oder vieler spannender Vorstellungstermine und Dienstreisen. An dieser Stelle möchte ich mich für die sehr geschätzte Zusammenarbeit mit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in der Werkstatt und im Sekretariat bedanken. Weiterhin möchte ich den wissenschaftlichen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen meine große Dankbarkeit zum Ausdruck bringen, ohne deren Hilfsbereitschaft diese Dissertation nicht möglich gewesen wäre. Dies gilt insbesondere Maximilian Flormann, Alexander Hafner, Jannes Iatropoulos und Silvia Thal sowie meinen früheren Bürokollegen Torben Hegerhorst, Dr.-Ing. Louisa Liesner, Marcel Kascha, Dr.-Ing. Torben Pawellek, Dr.-Ing. Marvin Rabben und Dr.-Ing. Adrian Sonka. Bei ihnen bedanke ich mich nicht nur für die tolle Zusammenarbeit, sondern auch für unsere freundschaftliche Verbundenheit. Adrian und Torben gilt zudem mein ausdrücklicher Dank für das Korrekturlesen der schriftlichen Ausarbeitung. Außerdem möchte ich mich bei allen Studierenden und wissenschaftlichen Hilfskräften bedanken, die mich bei der Bearbeitung unterschiedlicher Forschungsfragestellungen über die Jahre begleitet haben und somit zum Erfolg meiner Promotion beigetragen haben.

Abschließend gilt ein besonderer Dank meiner Familie, die mich auch in arbeitsintensiven Zeiten immer großartig unterstützt hat. Danke Mama Claudia, Oma Rose-Marie, Gisela, Albertus und Johanne! Meiner Verlobten Christina möchte ich sagen: Ich liebe dich und ich bin dir unendlich dankbar für dein Verständnis, deine Geduld, die hilfreichen Korrekturen sowie deine unermesslich wertvolle Beratung und Motivation.

Kurzfassung

Das automatisierte Fahren bildet neben der Elektrifizierung des Antriebs und der Digitalisierung einen aktuellen Forschungsschwerpunkt der Fahrzeugtechnik. Für die Etablierung höherer Automatisierungsstufen gilt es Lösungen für technische Herausforderungen zu finden und gleichzeitig die Akzeptanz und den Komfort potenzieller Nutzer sicherzustellen.

Die vorliegende Dissertation verbindet den Aufbau einer prototypischen Funktion für hochautomatisiertes Fahren an innerstädtischen Kreuzungen und Hauptverkehrsstraßen mit der funktionalen Bewertung aus Sicht der Nutzer. Auslegungsvarianten der für den Einsatz im realen Straßenverkehr entwickelten Fahrfunktion werden im Pkw-Versuchsträger auf einem Versuchsgelände durch Probanden in der Rolle des beobachtenden Fahrers hinsichtlich Kriterien wie Sicherheitsempfinden und Komfort beurteilt. Eine Objektivierung schafft Zielgrößen für die anwendungsfallspezifische Abstimmung und Optimierung zukünftiger Funktionen. Voruntersuchungen zu Insassenbewegungen und zur Abwendung vom Fahrgeschehen ergeben zudem, dass das automatisierte Fahrverhalten je nach Automatisierungsstufe unterschiedlichen Einfluss auf die Nutzerwahrnehmung hat. Das Vorgehen dient der Erweiterung des Kenntnisstandes aus bisherigen Studien, die andere Anwendungsfälle adressiert oder Bewertungen simulationsbasiert erhoben haben.

Unter Nutzung von Vehicle2X-Kommunikation und hochgenauen Karten fokussiert die entwickelte Fahrfunktion insbesondere die Szenarien „Annäherung an eine Lichtsignalanlage“ und „Linksabbiegen mit vorfahrtsberechtigtem Gegenverkehr“. Zentrale Funktionsbausteine wie Umfeldmodell, Handlungs- und Trajektorienplanung sowie Längs- und Querverführung werden mittels Model-in-the-Loop Simulation und Rapid Control Prototyping umgesetzt. Die Funktion wird unter Anwendung eines Sicherheitskonzepts im Fahrzeug implementiert und an der Forschungskreuzung in Braunschweig im realen Straßenverkehr demonstriert.

Anschließend erfolgt die Durchführung der Probandenstudie, welche die Grundlage für die Objektivierung des Fahrverhaltens der Automatisierung schafft. Hierzu findet eine Übertragung von Anwendungsfällen aus dem echten Verkehr auf Studienszenarien statt. Zudem werden Messdaten aus einer naturalistischen Fahrstudie mit dem Ziel analysiert, für die Studie Fahrverhaltensvarianten mit unterschiedlichen Dynamikausprägungen zu parametrieren. Zur objektiven Beschreibung des Fahrverhaltens werden charakteristische Kennparameter auf Basis von Messdaten gebildet, z. B. anhand von Zeitlücken zum Gegenverkehr oder Längs- und Querbeschleunigungen. Für die Studie werden neben dem Versuchsträger ein automatisiertes Objektfahrzeug im Gegenverkehr sowie eine Forschungslichtsignalanlage eingesetzt.

Die Beurteilungen liefern wertvolle Erkenntnisse im Hinblick auf situationsabhängige Präferenzen von Nutzern hinsichtlich des automatisierten Fahrverhaltens der Systemvarianten. Die Studie zeigt unter anderem, dass bei zu defensiver Funktionsauslegung in Abbiegesituationen mit Gegenverkehr ein Akzeptanzverlust droht. Durch Korrelations- und Regressionsanalysen werden Zusammenhänge zwischen Subjektivnoten und Kennparametern untersucht und Objektivnotenmodelle gebildet. Damit werden Metriken zur Unterstützung der nutzerorientierten Auslegung hochautomatisierter Fahrfunktionen im urbanen Umfeld geschaffen.

Abstract

In addition to the electrification of the drive system and the digitalization, automated driving is a main research focus in automotive engineering. In order to establish higher levels of automation it is necessary to find solutions to technical challenges and at the same time ensure users' acceptance and comfort.

This doctoral thesis combines the development of a prototypical function for highly automated driving at urban intersections and main roads with the functional evaluation from the user's perspective. Different variants of the driving function, which is primarily developed for use in real road traffic, are assessed on a proving ground by test subjects in the role of an observing driver with regard to criteria such as sense of safety and comfort. The method of objectification creates target values for parameterization and optimization in future applications. Preliminary investigations on occupant displacement and distraction during automated driving show that the perception of automated driving behavior depends on the level of automation. The research helps to increase the level of knowledge from previous studies that addressed other scenarios or made evaluations based on driving simulations.

The developed driving function focuses in particular on the scenarios "approaching a traffic light" and "left turn across path with traffic from the opposite direction". Using Vehicle2X-communication and highly precise maps, functional modules such as environment model, behavior and trajectory planning as well as longitudinal and lateral guidance are implemented using Model-in-the-Loop simulation and Rapid Control Prototyping. The function is demonstrated in real traffic at an intersection for research purposes in Braunschweig, Germany.

Furthermore, the test subject study is carried out to establish a basis for objectifying the driving behavior of automated vehicles. For this purpose, real traffic scenarios are applied to proving ground scenarios. Besides, measurements of the automated prototype and data from a naturalistic driving study are being analyzed with the aim of parameterizing driving behavior variants with different dynamic characteristics. For an objective description of the driving behavior, characteristic parameters are formed on the basis of measurement data, e.g. time gaps to oncoming traffic or accelerations. In addition to the test vehicle, an automatically controlled object vehicle in oncoming traffic and a research traffic light system are utilized for the study.

The assessments provide valuable information on the situational user preferences regarding automated driving behavior. One of the main findings of the study is that there is a risk of a loss of acceptance if the automated driving behavior is too defensive in turning situations with oncoming traffic. Correlation and regression analyses are used to investigate relationships between subjective grades and characteristic parameters. As a result, objective grade models are developed. This creates applicable metrics to support the user-oriented design of highly automated driving functions in urban environments.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Formelzeichenverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis	XIX
1. Einleitung	1
1.1. Hintergrund und Zielsetzung	1
1.2. Aufbau der Arbeit	3
2. Stand der Technik	5
2.1. Von längs- und querführender Fahrerassistenz zum automatisierten Fahren . .	5
2.2. Automatisierungsstufen und Anwendungsfälle	6
2.3. Funktionaler Aufbau automatisierter Fahrfunktionen	10
2.4. Anforderungen und Bewertung von FAS und automatisierten Fahrfunktionen	16
2.4.1. Zulassung und Standardisierung	18
2.4.2. Verbraucherschutz und Fachpresse	21
2.4.3. Test- und Bewertungsmethoden	24
3. Bewertungsmethodik für automatisierte Fahrfunktionen	29
3.1. Einflüsse auf die Bewertung des automatisierten Fahrens	29
3.1.1. Automatisierungsstufen und Abwendung vom Fahrgeschehen	30
3.1.2. Fahrzeuginsassenbewegung in Abhängigkeit von Systemeingriffen . .	33
3.1.3. Individueller Fahrstil	37
3.2. Objektivierungsmethode für automatisiertes Fahren	40
3.2.1. 3F Messkampagne und kennparameterbasierte Fahrverhaltensanalyse	42
3.2.2. Testgeländestudie mit Subjektivbewertung durch Probanden	44
3.2.3. Statistische Auswertung von Subjektivbewertungen und Kennpara-	
metern	46
4. Fahrzeugautomatisierung für Stadtkreuzungen	51
4.1. Anwendungsfälle an der Stadtkreuzung	51
4.2. Aufbau der Versuchsträger TIAMO & TEASY 3	54
4.3. Infrastruktur	57
4.4. Funktionsentwicklung, -implementierung und -test	60
4.4.1. Vorgehen und Entwicklungstools	60
4.4.2. Merkmalbasiertes Umfeldmodell	62
4.4.3. Handlungsplanung mit dynamischen Umfeldinformationen	66
4.4.4. Pfad- und Trajektorienplanung mit hochgenauen Karten	71

4.4.5. Längs- und Querführung	77
4.4.6. Implementierung für sicheren Testbetrieb	81
5. Objektivierungsstudie zum automatisierten Fahren an Stadtkreuzungen	83
5.1. Szenarienauswahl und Übertragung auf ein Versuchsumfeld	83
5.2. Menschliches und automatisiertes Verhalten im realen Verkehr	86
5.2.1. Szenarienidentifikation in 3F-Messdaten	87
5.2.2. Kennparameterbasierte Analyse des Fahrverhaltens	89
5.3. Systemverhaltensvarianten	95
5.4. Probandenstudie	101
5.4.1. Ablauf der Studie	101
5.4.2. Befragung	102
5.4.3. Technische Anforderungen und Durchführung	104
5.5. Ergebnisse	108
5.5.1. Datenbasis subjektiver Bewertungen	109
5.5.2. Datenbasis objektiver Kennparameter	121
5.5.3. Korrelationen und Objektivnotenmodelle	125
5.5.4. Schlussfolgerungen	130
6. Zusammenfassung und Ausblick	133
Literatur	137
Anhang	
A. Forschungsprojekte zum automatisierten Fahren in der Stadt	157
B. Funktionsentwicklung, -implementierung und -test	159
C. Studienablauf und Befragung	160
D. Subjektivbewertungen	164
E. Objektivnotenmodelle	166

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Logische Funktionsarchitektur für Automatisierungsstufe 3 und höher.	15
2.2.	Euro NCAP Kreuzungsszenario AEB Car-to-Car Front turn-across-path (eigene Darst. in Anlehnung an [56]).	22
2.3.	Grundstruktur des V-Modells (eigene Darst. in Anlehnung an [171]).	25
3.1.	Beschleunigungs- und Abstandsverläufe von zwei Varianten der Abstandsregelung (oben) und Subjektivbewertungen in Abhängigkeit der Automatisierungsstufe und Ablenkung (unten) (eigene Darst. in Anlehnung an [133]). . .	32
3.2.	Varianten der kombinatorisch vollständig getesteten Versuchsparameter zur Fahrzeuginsassenbewegung (eigene Darst. in Anlehnung an [131]).	34
3.3.	Rohbilder eines Zeitschritts der Insassenbewegung eines Probanden mit Messmarkierungen (jeweils linke und rechte Kamera) [131].	35
3.4.	Einfluss der Automatisierungsstufe bei Teilverzögerung auf durchschnittliche Vorverlagerung der Brust (oben), Boxplots der x-Position des Kopfes für verschiedene Haltungen und Nutzung eines reversiblen Gurtstraffers (unten). . .	36
3.5.	Methode zur Objektivierung automatisierter Fahrfunktionen.	41
4.1.	Forschungskreuzung Hagenring/Hans-Sommer-Str. in Braunschweig: Linksabbiegen mit vorfahrtsberechtigtem Gegenverkehr.	53
4.2.	Versuchsträger für automatisiertes Fahren am IFF (eigene Darst., Fotos: Adrian Sonka).	55
4.3.	Hardwarearchitektur der IFF-Versuchsfahrzeuge. Hellgraue Boxen stellen Sensoren, weiße Boxen weitere Hardware und Rechner, dunkelgraue Boxen Softwarekomponenten dar (eigene Darst. in Anlehnung an [197]).	56
4.4.	Messung einer menschlichen Trajektorienwahl beim Linksabbiegen, im Hintergrund befinden sich OpenDRIVE Karte und Scanpunkte der Fahrbahnmarkierungen.	59
4.5.	Aufbau des Umfeldmodells mit Boxrepräsentation dynamischer Objekte (unten links), gerasterter Belegungskarte (unten Mitte) und OpenDRIVE Karte (unten rechts) (eigene Darst. in Anlehnung an [91]).	63
4.6.	Abstrahierte Darstellung des modellierten Statecharts für die Handlungsplanung der automatisierten Fahrfunktion.	67
4.7.	Routen- und Trajektorienplanung mit Lokalisierung auf einer hochgenauen Straßenkarte.	72
4.8.	Erreichung eines längsdynamischen Zielzustands aus einem Startzustand durch iterative Lösung eines Optimalsteuerungsproblems (links), Trajektorienplanung mit Auswahl aus einer Schar abschnittsweise definierter Trajektorienverläufe (Beispiel für a_x rechts).	75
4.9.	Aufbau der Längsregelung der automatisierten Fahrfunktion.	77
4.10.	Zustandsraumdarstellung eines Sliding Mode ACC-Reglers.	79

4.11. Aufbau der Querregelung der automatisierten Fahrfunktion.	80
4.12. Sicherheitskonzept für automatisierten Prototypen.	82
5.1. Übertragung der Manöverabläufe aus Anwendungsfällen an der Forschungs- kreuzung auf Szenarien der Testgeländestudie: Oben „Ampelstopp“, unten „Linksabbiegen mit vorfahrtsberechtigtem Gegenverkehr“ (eigene Darst., Bild- quelle: Google Earth Pro).	85
5.2. Einteilung des Fahrverhaltens auf verschiedenen Funktionsebenen als Grund- lage für die Auswahl von Kennparametern.	89
5.3. Boxplots ausgewählter KP der Annäherung und Überfahrt im Szenario Ampel- stopp mit Vergleich zwischen Fahrern und ADS.	92
5.4. Boxplots ausgewählter KP der Annäherung und Überfahrt im Szenario Links- abbiegen mit Vergleich zwischen Fahrern und ADS.	94
5.5. Zeitverläufe der Fahrgeschwindigkeit (oben) und der Längsbeschleunigung (unten) der Varianten Komfort (n = 19), Basis (n = 38) und Sport (n = 19) im Szenario Ampelstopp.	96
5.6. Zeitverläufe der Fahrgeschwindigkeit (oben) und der Längsbeschleunigung (unten) der Varianten Komfort (n = 20), Basis (n = 40) und Sport (n = 19) im Szenario Linksabbiegen mit vorfahrtsberechtigtem Gegenverkehr.	98
5.7. Zeitverläufe der Querbeschleunigung der Varianten Komfort (n = 20), Basis (n = 40) und Sport (n = 19) im Szenario Linksabbiegen mit Gegenverkehr.	99
5.8. Relative Positionen zwischen dem automatisierten Fahrzeug (Ego) und dem Gegenverkehrsobjekt zu Beginn des Anfahrens aus der Warteposition für die drei Verhaltensvarianten aus 80 Messungen.	100
5.9. Skalen der Subjektivbefragung.	103
5.10. Hochgenaue digitale Karte der Fahrspuren des Verkehrsübungsplatzes Braun- schweig Waggum im OpenDRIVE Format, links vollständig, rechts reduziert für die Studie.	105
5.11. Ampelstopp in der Testgeländestudie mit mobiler Forschungs-LSA (oben), Linksabbiegen mit Versuchsträgern TEASY 3 und TIAMO in mittels Car2Car- Kommunikation koordiniertem Manöverablauf (unten).	106
5.12. Ablauf der WLAN-Kommunikation zwischen dem Funktionsfahrzeug TEASY 3 und dem Objektfahrzeug TIAMO, das synchronisiert und automatisiert den Gegenverkehr darstellt.	107
5.13. Wahrscheinlichkeitsnetze des Kriteriums Gesamtbewertung des Abbiegevor- gangs im Szenario Linksabbiegen (Darst. mittels Programm von [93]).	110
5.14. Bevorzugte Varianten hinsichtlich der Subjektivkriterien für das Szenario Ampel- stopp (K = Komfort, B = Basis, S = Sport, keine = alle Varianten identisch bewertet).	111
5.15. Bevorzugte Varianten hinsichtlich der Subjektivkriterien für das Szenario Links- abbiegen mit vorfahrtsberechtigtem Gegenverkehr (K = Komfort, B = Basis, S = Sport, keine = alle Varianten identisch bewertet).	112

5.16. Boxplots der Subjektivbewertungen des Verzögerungsmanövers im Szenario Ampelstopp.	114
5.17. Boxplots der Subjektivbewertungen des Verzögerungs- und des Anfahrmanövers im Szenario Ampelstopp.	114
5.18. Boxplots der Subjektivbewertungen zur Kurvendurchfahrt vor der Kreuzungssituation im Szenario Linksabbiegen.	115
5.19. Boxplots der Subjektivbewertungen des Abbiegemanövers im Szenario Linksabbiegen.	117
5.20. Histogramm der gemessenen Zeitlücken, zu denen spätestens ein Abbiegevorgang starten sollte, um vor dem entgegenkommenden Fahrzeug abzubiegen, sowie Parameter einer geschätzten Normalverteilung (oben rechts).	121
5.21. Vorgehen zur Transformation von KP für die lineare Regressionsanalyse.	126
5.22. ON-Modell Ampelstopp A1, SN Gesamtbewertung Verzögerung.	129
5.23. ON-Modell Linksabbiegen L3/L4, SN Gesamtbewertung Abbiegen.	129
B.1. Entwicklungs- und Simulationstools. Oben: Hauptebene des Rahmenmodells der automatisierten Fahrfunktion in Matlab/Simulink, in der Mitte: MiL Simulation der Handlungsplanung mit IPG CarMaker, unten: grafische Benutzeroberfläche für die Bedienung des Funktionsmodells auf dem RCP-System in dSPACE ControlDesk.	159
E.1. ON-Modell Ampelstopp A1, SN Sicherheitsgefühl Verzögerung.	167
E.2. ON-Modell Ampelstopp A1, SN Komfort Verzögerung.	167
E.3. ON-Modell Ampelstopp A1, SN Intensität Bremsen.	168
E.4. ON-Modell Ampelstopp A1, SN Zeitpunkt Bremsen.	168
E.5. ON-Modell Ampelstopp A2, SN Intensität Anfahren.	169
E.6. ON-Modell Linksabbiegen L1/L2, SN Komfort Kurvenfahrt.	169
E.7. ON-Modell Linksabbiegen L1/L2, SN Kurvengeschwindigkeit.	170
E.8. ON-Modell Linksabbiegen L3/L4, SN Sicherheitsgefühl Abbiegen.	170
E.9. ON-Modell Linksabbiegen L3/L4, SN Komfort Abbiegen.	171
E.10. ON-Modell Linksabbiegen L3/L4, SN Intensität Bremsen.	171
E.11. ON-Modell Linksabbiegen L3/L4, SN Wartezeit nach Gegenverkehr.	172
E.12. ON-Modell Linksabbiegen L3/L4, SN Intensität Anfahren.	172

Tabellenverzeichnis

2.1. Übersicht der Automatisierungsstufen von SAE, BAsT und VDA (eigene Darstellung in Anlehnung an [97]).	8
5.1. Szenarien und Fahrmanöver für die Bewertung der automatisierten Fahrfunktion	84
5.2. Auswahl von Kennparametern zur Analyse des Fahrverhaltens im Szenario Ampelstopp (3F-Messdaten).	90
5.3. Auswahl von Kennparametern zur Analyse des Fahrverhaltens im Szenario Linksabbiegen mit vorfahrtsberechtigtem Gegenverkehr (3F-Messdaten).	91
5.4. Korrelationskoeffizienten r und Quadrantenkorrelation CQ für die Subjektivkriterien des Verzögerungsmanövers im Szenario Ampelstopp (oben) und des Abbiegemanövers im Szenario Linksabbiegen (unten).	119
5.5. Statistische Maßzahlen ausgesuchter objektiver Kennparameter für das Studienszenario Ampelstopp.	123
5.6. Statistische Maßzahlen ausgesuchter objektiver Kennparameter für das Studienszenario Linksabbiegen.	123
5.7. Korrelationen zwischen ausgesuchten objektiven Kennparametern und z-standardisierten Subjektivnoten: oben Ampelstopp, in der Mitte Kurvenfahrt vor Abbiegeszenario, unten Linksabbiegen.	125
5.8. Korrelationen zwischen ausgesuchten, jeweils auf eine Referenzvariante transformierten Kennparametern und z-standardisierten Subjektivnoten: oben Ampelstopp, in der Mitte Kurvenfahrt vor Abbiegeszenario, unten Linksabbiegen.	128
A.1. Beispiele für Forschungsprojekte mit Realdemonstrationen zum automatisierten Fahren in innerstädtischen Szenarien.	157
C.1. Zeitlicher Ablauf der Bewertungsstudie.	160
C.2. Soziodemografischer Fragebogen zur Einführung.	161
C.3. Fragebogen für Szenario Ampelstopp der Objektivierungsstudie.	162
C.4. Fragebogen für Szenario Linksabbiegen der Objektivierungsstudie.	163
D.1. Statistische Maßzahlen der normierten und ausreißerbereinigten Subjektivnoten für das Studienszenario Ampelstopp.	164
D.2. Statistische Maßzahlen der normierten und ausreißerbereinigten Subjektivnoten für das Studienszenario Linksabbiegen.	165
E.1. KP Transformationsparameter KP_{Ref} und g_{KP} für ON-Modelle.	166

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a_x	m/s^2	Längsbeschleunigung
a_y	m/s^2	Querbeschleunigung
b	–	Regressionskoeffizient
c	–	Polynomkoeffizient
c_{sv}	N/rad	Schräglaufsteifigkeit an der Vorderachse
c_{sh}	N/rad	Schräglaufsteifigkeit an der Hinterachse
C_L	Nm/rad	Lenkungssteifigkeit
CQ	–	nichtparametrische Quadrantenkorrelation
d	m	Abstand
d_Q	–	Interquartilsabstand
e	–	Residuum
F	N	Kraft
F	–	empirischer F-Wert
H	–	Hypothese eines statistischen Tests
i_L	–	Lenkübersetzung
J	–	Gütefunktional
K	–	Anzahl von Regressoren
k	–	Gewichtungsfaktoren des Gütefunktionals
KP	–	Kennparameter
l	m	Radstand
l_h	m	Schwerpunktvorlage
l_v	m	Schwerpunktrücklage
m	kg	Masse
m_i	–	Kartenzelle einer Rasterkarte
M	$1/\text{m}^2$	Krümmungsänderung (Ableitung von κ nach dem Weg)
N	–	Anzahl von Beobachtungen einer Stichprobe
n_v	m	gesamter Nachlauf am vorderen Rad
ON	–	Objektivnote
p	–	Wahrscheinlichkeit
Q	–	Testgröße des Dean-Dixon-Ausreißertests
QI	–	Quality-Index
r	m	Kurvenradius
r	–	Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson
R	–	Spannweite
R^2	–	Bestimmtheitsmaß
\bar{R}^2	–	adjustiertes Bestimmtheitsmaß

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
s	m	Wegstrecke
s_B	m	Bremsweg
s_R	m	Reaktionsweg
s	–	Stichprobenstandardabweichung
s^2	–	Stichprobenvarianz
SN	–	Subjektivnote
t	s	Zeit, Dauer
t_R	s	Reaktionsdauer
t	–	empirischer t-Wert
v	m/s	Geschwindigkeit
v_x	m/s	Fahrzeuglängsgeschwindigkeit
x	m	Weg in Längsrichtung
\dot{x}	m/s	Geschwindigkeit in Längsrichtung
\ddot{x}	m/s ²	Beschleunigung in Längsrichtung
\ddot{x}_V	m/s ²	Verzögerung in Längsrichtung
\ddot{x}	m/s ³	Ruck in Längsrichtung
x	–	unabhängige Variable
X	–	Zufallsvariable einer Verteilung
y	m	Weg in Querrichtung
y	–	abhängige Variable
z_t	–	aktuelle Messung zum Zeitpunkt t
Z	–	standardisierte Zufallsvariable einer Verteilung

Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
α	rad, °	Schräglaufwinkel
α	%	Signifikanzniveau
δ, delta	rad, °	Lenkradwinkel
$\dot{\delta}, \text{deltap}$	rad/s, °/s	Lenkradwinkelgeschwindigkeit
δ_v	rad, °	Vorderradeinschlagwinkel
Δ	–	Differenz-/Relativwert
κ	1/m	Krümmung (Kehrwert des Kurvenradius)
μ	–	Populationsmittelwert
σ	–	Standardabweichung einer Grundgesamtheit
$\hat{\sigma}$	–	geschätzter Standardfehler
σ^2	–	Varianz einer Grundgesamtheit
ψ	rad, °	Gierwinkel
$\dot{\psi}, \text{psip}$	rad/s, °/s	Gierrate

Indizes

Formelzeichen	Bedeutung
0	Anfangszustand, Null-
<i>Ego</i>	Eigen-
<i>E</i>	Endzustand
<i>ges</i>	gesamt
<i>h</i>	Hinterachse
<i>k</i>	k-ter Regressor einer Regressionsfunktion
<i>L</i>	Lenkung
<i>max</i>	maximal
<i>med</i>	Median
<i>min</i>	minimal
<i>mit</i>	Mittelwert
<i>n</i>	n-ter Beobachtungswert einer Stichprobe
<i>p</i>	p-Quantil mit $0 \leq p \leq 1$
<i>rel</i>	relativ
<i>v</i>	Vorderachse
<i>VP</i>	Versuchsperson
<i>x</i>	in x-Richtung
<i>y</i>	in y-Richtung
<i>z</i>	in z-Richtung, z-standardisiert

Abkürzungsverzeichnis

3F	Fahrer-Fahrzeug-Fahrumgebung, Forschungssystematik des IFF
5G	5. Generation des Mobilfunks
ABS	Anti-Blockier-System
ACC	Adaptive Cruise Control, dt.: Abstandsregeltempomat
ACSF	Automatically Commanded Steering Function (nach UNECE R79), dt.: automatisch gesteuerte Lenkungsfunktion
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems, dt.: Fahrerassistenzsysteme
ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer, Inertialmesssystem der Firma Genesys
ADS	Automated Driving System, dt.: automatisiertes Fahrsystem
ADTF	Automotive Data and Time-Triggered Framework, Software der Firma Elektrobit
AEB	Autonomous Emergency Braking, dt.: Automatischer Notbremsassistent
AIM	Anwendungsplattform Intelligente Mobilität, vom DLR betreute Großforschungsanlage zur Verkehrsforschung in Braunschweig
ALKS	Automated Lane Keeping System (Level 3 ADS nach UNECE R157), dt.: hochautomatisiertes Spurhaltesystem
AMS	auto motor und sport, deutsche Publikumszeitschrift zum Thema Automobil
ATZ	Automobiltechnische Zeitschrift
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen, Forschungsinstitut des BMVI
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
C2X	Car2X, siehe V2X
CAM	Co-operative Awareness Message, V2X-Nachricht zur Übertragung von Informationen über Typ, Position und Zustand eines vernetzten Fahrzeugs
CAN	Controller Area Network, serielles Feldbussystem zur Vernetzung von Steuergeräten
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency, Forschungsinstitut des Verteidigungsministeriums der USA
DDT	Dynamic Driving Task, dt.: dynamische Fahraufgabe
DENM	Decentralized Environmental Notification Message, V2X-Nachricht zur Übertragung von Warnungen zu Gefahrenstellen oder Verkehrssituationen
DGPS	differentielles GPS

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DVRS	Dynamic Vehicle Road Simulator, dynamischer Fahrsimulator am IfF
ECU	Electronic Control Unit, dt.: Steuergerät
E/E	Elektrik/Elektronik
EPS	Electric Power Steering, dt.: elektromechanische Lenkkraftunterstützung
ESC	Electronic Stability Control, dt.: elektronische Stabilitätskontrolle
ESM	lineares Einspurmodell
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme, dt.: Europäisches Neuwagen-Bewertungs-Programm
FAS	Fahrerassistenzsystem(e)
FOT	Field Operational Test, dt.: Feldstudie zur Untersuchung von Systemen im Realverkehr
GNSS	Global Navigation Satellite System, dt.: globales Satellitennavigationssystem
GOM	Gesellschaft für optische Messtechnik mbH
GPS	Global Positioning System, dt.: globales Positionsbestimmungssystem aus den USA
HiL	Hardware-in-the-Loop
HMI	Human Machine Interface, dt.: Mensch-Maschine-Schnittstelle
I2V	Infrastructure-to-Vehicle, elektronische Vernetzung und Kommunikation von Fahrzeugen mit Infrastrukturkomponenten
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IfF	Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig
IMC	Internal Model Control, dt.: Prädiktivregler mit internem Modell
IMU	Inertial Measurement Unit, dt.: Inertialmesssystem
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transportation Systems, dt.: intelligente Verkehrssysteme
KP	Kennparameter
LGS	Lineares Gleichungssystem
LKA	Lane Keeping Assistance, dt.: Spurhalteassistent
LSA	Lichtsignalanlage
MaaS	Mobility-as-a-Service, dt.: Sammelbegriff für kundenorientierte Mobilitätsdienste
MAPEM	Map Extended Message, I2V-Nachricht zur Übertragung von Straßentopologien
MiL	Model-in-the-Loop

MPC	Model Predictive Control, dt.: modellprädiktiver Regler
NDS	Naturalistic Driving Study, dt.: naturalistische Fahrstudie zur Untersuchung des Fahrerverhaltens oder Unfallgeschehens
NTP	Network Time Protocol, Zeitprotokoll zur Synchronisierung von Uhren in Computernetzwerken
ODD	Operational Design Domain, dt.: definierter Anwendungsbereich
OEDR	Object and Event Detection and Response, dt.: Erkennung von Objekten und Ereignissen und Reaktion auf diese
ON	Objektivnote
PET	Post Encroachment Time, Zeitdifferenz zur Beschreibung einer potenziellen Kollisionsgefahr zwischen zwei Verkehrsobjekten
PID	Proportional-Integral-Differenzial (Regler)
RCP	Rapid Control Prototyping, dt.: schnelles Entwickeln von Reglerprototypen
RT	Real Time, dt.: Echtzeit
SAE	Society of Automotive Engineers, amerikanisches Standardisierungsinstitut für Verkehrstechnologie
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SiL	Software-in-the-Loop
SMC	Sliding Mode Control, dt.: Sliding Mode Regelung
SN	Subjektivnote
SPATEM	Signal Phase And Timing Extended Message, I2V-Nachricht zur Übertragung von Lichtsignalphasen
TEASY 3	Testing and Engineering of Automated driving SYstems, Fahrzeugversuchsträger des IfF
TIAMO	Testing of Integrated Automation and MOnitoring systems, Fahrzeugversuchsträger des IfF
TSK	Triebstrangkoordinator, Steuergerätefunktion bei VW-Fahrzeugen zur Umsetzung längsdynamischer Anforderungen von FAS
TTC	Time To Collision, dt.: Zeit bis zur Kollision
TUBS	Technische Universität Braunschweig
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe, dt.: Vereinte Nationen Wirtschaftskommission für Europa
US	Ultraschall als Sensortechnologie zur Abstandsmessung im Nahbereich
UTM	Universal Transverse Mercator, globales Erdkoordinatensystem mit kartesischen Koordinaten (Abbildung des Erdellipsoids mittels transversaler Mercator-Projektion)
V2V	Vehicle-to-Vehicle, elektronische Vernetzung und Kommunikation zwischen Fahrzeugen

V2X	Vehicle-to-everything, elektronische Vernetzung und Kommunikation zwischen Fahrzeugen und von Fahrzeugen mit Infrastrukturkomponenten
VDA	Verband der Automobilindustrie
ViL	Vehicle-in-the-Loop
VRU	Vulnerable Road Users, dt.: schwächere Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Fahrradfahrer
VUT	Vehicle Under Test, dt.: Fahrzeug, welches getestet wird
VW	Volkswagen
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments (Gruppe von V2X Standards nach IEEE 1609), dt.: drahtloser Zugang in Fahrzeugumgebungen
WLAN	Wireless Local Area Network, dt.: drahtloses, lokales Netzwerk, im englischsprachigen Raum ist Wi-Fi für Wireless Fidelity gebräuchlich
XML	Extensible Markup Language, von Menschen und Maschinen lesbare Sprache für hierarchisch strukturierte Daten
XODR	OpenDRIVE XML-Datei, Format für hochgenaue, digitale Karten