



Graz University of Technology

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Beurteilung des Fahrverhaltens bei unterschiedlichen Automatisierungsstufen mittels Fahrsimulator

MASTERARBEIT

vorgelegt von

Georg Hanzl, BSc.

bei

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Graz, 07. Mai 2018

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 14.01.2013
Genehmigung des Senats am 27.05.2013.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, _____

Georg Hanzl, BSc.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, _____

Georg Hanzl, BSc.

Aufgabenstellung für die Masterarbeit

von Georg Hanzl, BSc.

Graz, 26.10.2016

Funktionale Szenarienanalyse des Fahrverhaltens mittels Fahrsimulator

Problemstellung

Mobilität ist ein großes Bedürfnis der Menschen. Durch die Entwicklung und die Serienproduktion der Personenkraftwagen wurde einer breiten Masse die Möglichkeit geboten, ihre Mobilität flexibler als je zuvor auszuleben. Seither wird versucht, dieses Mobilitätsangebot sicherer und komfortabler zu gestalten. Ein großes Thema, das gerade in den letzten Jahren immer stärker öffentlichkeitswirksam zur Sprache kommt, ist das Thema „Automatisiertes Fahren“.

Von selbstfahrenden Autos erhofft man sich eine Steigerung der Verkehrssicherheit und des Komforts. Seitens der Infrastruktur erwartet man sich eine höhere Leistungsfähigkeit von bestehenden Straßen, da beispielsweise die Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen verkürzt werden könnten. Die Entwicklung und Einführung autonomer Fahrzeuge bedarf jedoch eines hohen technischen und finanziellen Aufwands. Gerade die Entwicklung und Produktion diverser Mess-, Regelungs-/Steuerungs- und Überwachungssysteme wird sowohl in der Infrastruktur- als auch in der Automobilindustrie in den nächsten Jahren und Jahrzehnten ein großes Forschungsgebiet darstellen. Der Übergang zu fahrerlosen Fahrzeugen wird eine schrittweise Entwicklung und eine laufende Verbesserung der Systeme erfordern. Um diese Umstellung geordnet durchzuführen und eine einheitliche Definition dieser Umstellungsschritte zu erhalten, hat die Society of Automotive Engineers (kurz: SAE International) sechs Kategorien festgelegt. Diese reichen von Level 0 (keine Unterstützung beim Fahren durch das Fahrzeug) bis Level 5 (das Fahrzeug fährt von alleine / es wird kein Fahrer benötigt).

Für die Verkehrsplanung und die Betreiber der Straßeninfrastruktur sind vor allem die Auswirkungen der einzelnen Einführungs- und Durchdringungsstufen auf die bestehende Infrastruktur von Interesse. Fahrerassistenzsysteme bieten ein Potenzial zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit, des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit. Große Herausforderungen stellen jedoch das Sicherheitskonzept und die Zuverlässigkeit der Funktionen bei der Vielfalt von real möglichen Szenarien, die sich aus der Wechselwirkung zwischen Fahrer, Fahrzeug und Verkehrssituation ergeben. Um das Fahrverhalten für unterschiedliche Fahrsituationen untersuchen zu können, bieten sich Studien mit Fahrsimulatoren an.

Gegenüber der Durchführung von Studien im Straßenverkehr hat die Fahrsimulation zwei wesentliche Vorteile: Im Simulator können Verkehrsszenarien hergestellt und in der gleichen Weise immer wieder reproduziert werden. So können Probanden mit Szenarien konfrontiert werden, die in der Realität nur selten vorkommen. Auch Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern können gezielt hergestellt werden, was im Straßenverkehr so nur schwer möglich ist.

Aufgabenstellung

Die folgende Liste enthält wesentliche Bearbeitungspunkte der vorliegenden Masterarbeit. Abweichungen mit fortschreitendem Erkenntnisstand während der Bearbeitung sind möglich:

- Literaturanalyse zum Thema Fahrverhalten und zum Thema des automatisierten Fahrens und damit einhergehenden Veränderungen der Fahrverhaltensparameter
- Testszenariengenerierung von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen an hochrangigen Netzabschnitten
 - Unterschiedliche Ausbauvarianten der Strecke
 - Berücksichtigung unterschiedlicher Verkehrsstärken
 - Variation unterschiedlicher Fahrverhalten, mit Fokus auf automatisiertem Fahren unterschiedlicher SAE-Stufen
- Überprüfung der Mikrosimulationen am FTG-Fahrsimulator für eine definierte Anzahl an zuvor erstellten Mikrosimulationsszenarien
- Aufbereitung der gewonnenen Daten des Fahrsimulators für Mikrosimulationen
- Bestimmung des funktionalen Zusammenhangs der automatisierten Fahrverhalten auf die Leistungsfähigkeit der Testszenarien

Für die Anfertigung der Masterarbeit wird die Verkehrsflussoftware VISSIM sowie Statistiksoftware (r-project) am Institut für Straßen- und Verkehrswesen zur Verfügung gestellt. Der Diplomand verpflichtet sich, die Software sowie die bereitgestellten Daten ausschließlich zur Anfertigung der Masterarbeit zu nutzen und bei der Datenaufbereitung und Datenanalyse der zur Verwendung gestellten Daten Datenschutzrichtlinien einzuhalten.

Die Arbeit ist zweifach mit allen Anlagen in DIN A4 gebunden einzureichen. Ein Datenträger mit dem Masterarbeitstext, Präsentationen sowie allen Modelldaten ist beizulegen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf
Tel. +43 316 873 6220
martin.fellendorf@tugraz.at
Institut für Straßen- und Verkehrswesen
TU Graz
Betreuer

Dipl.-Ing. Michael Haberl, BSc
Tel. +43 316 873 6226
michael.haberl@tugraz.at
Institut für Straßen- und Verkehrswesen
TU Graz
mitbetreuender Assistent

Kurzfassung

Beurteilung des Fahrverhaltens bei unterschiedlichen Automatisierungsstufen mittels Fahrsimulator

110 Seiten, 87 Abbildungen, 6 Tabellen

Das Thema "Automatisiertes Fahren" sorgte in den vergangenen Jahren in den Medien immer wieder für Schlagzeilen. Seien es die ersten Fahrversuche automatisierter Fahrzeuge im Straßenverkehr oder aber deren ersten Unfälle, die Menschen verfolgen mit Spannung die Entwicklungen der neuen Mobilität. Zugleich erscheinen auch immer mehr Studien und Forschungsberichte, welche – im Zusammenhang mit automatisiertem Fahren – auf die Vorzüge bezüglich Reisezeitersparnis und die stabilisierende Wirkung auf den Verkehrsfluss hinweisen. Diese Effekte setzen jedoch meist eine hohe Durchdringungsrate von automatisiert fahrenden Fahrzeugen voraus.

In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass die Durchdringungsrate neu eingeführter Fahrzeugtechnologien im Straßenverkehr erst über einen längeren Zeitraum steigt. Somit ist davon auszugehen, dass es auch im Hinblick auf die Einführung automatisierter Fahrzeuge im realen Verkehr einen längeren Zeitraum geben wird, in welchem sich ein Mischverkehr zwischen Fahrzeugen ohne automatisierten Fahrfunktionen und Fahrzeugen mit automatisierten Fahrfunktionen in unterschiedlichen Automatisierungsstufen ergeben wird.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde auf die Komponente „Mensch“ im Mischverkehr eingegangen. Dabei sollte sowohl das subjektive Empfinden als auch das Fahrverhalten bei Interaktionen mit automatisierten Fahrzeugen aufgenommen und anschließend ausgewertet werden. Für diese Aufgabenstellung bot sich die Durchführung einer Probandenstudie mittels eines Fahrsimulators an.

Da zunächst die Einführung automatisierter Fahrfunktionen in konfliktarmen Verkehrssituationen (wie z.B. auf Autobahnen) am wahrscheinlichsten ist, wurde für diese Studie ein rund 14 km langer, dreistreifiger Autobahnabschnitt mit drei Ab- bzw. Auffahrten und zwei Verflechtungsstrecken modelliert. Diese Teststrecke wurde von 24 Probanden in einem Fahrsimulator jeweils drei Mal durchfahren. Dabei wurde das Fahrverhalten der zusätzlich eingespielten Fahrzeuge variiert. So wurde ein Referenzszenario mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 0 erstellt. Im zweiten und dritten Szenario wurden den zusätzlich simulierten Fahrzeugen automatisierte Fahrfunktionen entsprechend dem SAE level 4 zugewiesen, wobei die eingehaltenen Sicherheitsdistanzen bei Folgefahrten variiert wurden.

In den Auswertungen des subjektiven Befindens der Probanden zeigte sich, dass die Fahrverhalten entsprechend SAE level 0 den meisten Zuspruch fanden. Sowohl im Folgeverhalten als auch im Fahrstreifenwechselverhalten wurden die eingehaltenen Abstände und die aufgetretenen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten der Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen durchschnittlich stärker kritisiert als in dem Szenario mit einem Fahrverhalten entsprechend SAE level 0. Zusätzlich zu den Befragungen wurden die Fahrverhalten der Probanden ausgewertet. Dabei wurden die Trajektorien des virtuellen Fahrzeugs des Probanden und aller Fahrzeuge in dessen Nähe abhängig vom jeweiligen Szenario analysiert. Insbesondere wurden die eingehaltenen Sicherheitsabstände bei Folgefahrten und bei Fahrstreifenwechseln untersucht und mit jenen der anderen Szenarien verglichen. Dabei zeigte sich, dass es keine wesentlichen Änderungen der Sicherheitsabstände bei Folgefahrten oder Fahrstreifenwechseln durch die Probanden gab.

Abstract

Assessment of driving behaviour at different levels of automatization based on a driving simulator

110 pages, 87 figures, 6 tables

In the past few years “automated driving” has constantly made headlines in the media. People are curiously watching the developments of the new mobility, either the first road tests of automated vehicles have been published or their first accidents. At the same time more and more studies and research reports appear. These studies and reports are pointing out the advantages of “automated vehicles” in terms of i.e. travel time savings or the stabilizing effects on the traffic flow. However, these effects usually require a high penetration rate of automated vehicles.

Empiricism shows that the permeation rate of newly introduced vehicle technologies in road traffic has usually been increasing over an extensive period of time. From these observations, it may be concluded that there will exist a certain introduction phase of “automated driving”, during which a mixed traffic of both, vehicles without automated driving functions and vehicles with automated driving functions (with different levels of automation) will appear.

In this master thesis the component “human being” in mixed traffic is discussed. The goal is to investigate the subjective perception of the human drivers, as well as their driving behaviour during interaction with automated vehicles. Both parameters should be recorded and subsequently benchmarked. The determined approach for this study was to do research on human subjects by launching them into a driving simulator.

Since the introduction of automated driving functions will initially occur most likely on highways, a 14 kilometre long three-lane-motorway with five intersections has been modelled for this study. This test route was then cruised three times in a driving simulator by each of the 24 probands. In each of those three scenarios the simulated vehicles got either a human (pursuant SAE level 0) or an automated driving behaviour (matching SAE level 0) with two different follow distances.

The subjective opinion of the probands showed that interactions with vehicles with a driving behaviour according to SAE level 0 were preferred. The safety distances and the speed and accelerating behaviour in the following and lane changing behaviour were criticised more than in the scenario with vehicles without automated driving functions. Additionally, the trajectories of the probands and the surrounding vehicles were analysed depending on the scenario in question. The comparison of the safety distances of following vehicles and lane changes with those of the other scenarios showed that there were no essential changes in the different scenarios.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	ix
Abkürzungsverzeichnis.....	xi
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	4
2.1 Automatisierte Fahrfunktionen.....	4
2.2 Fahrzeugfolgeverhalten in Mikrosimulationsmodellen.....	6
2.2.1 Kinematisches Abstandsmodell.....	6
2.2.2 Gazis-Herman-Rothery-Modell (GHR).....	7
2.2.3 Gipps-Modell.....	8
2.2.4 Psycho-physisches Abstandsmodell.....	9
2.3 Fahrstreifenwechsel in Mikrosimulationen.....	13
2.3.1 Fahrstreifenwechselmodell nach Gipps.....	14
2.3.2 Fahrstreifenwechselmodell nach Sparmann.....	15
2.3.3 Fahrstreifenwechselverhalten in VISSIM.....	15
2.4 Fahrdynamische Kenngrößen.....	16
2.4.1 Fahrdauer.....	17
2.4.2 Durchschnittliche Geschwindigkeit.....	17
2.4.3 Durchschnittliche positive Beschleunigung.....	17
2.4.4 Durchschnittliche negative Beschleunigung.....	18
2.4.5 Median der negativen Beschleunigung.....	18
2.4.6 maximale negative Beschleunigung.....	19
2.4.7 Standardabweichung der Beschleunigung (Beschleunigungsrauschen).....	19
2.5 Zeit bis zur Kollision (ttc).....	19
3 Aufbau der Simulationsumgebung.....	21
3.1 Verkehrsflussmodell.....	22
3.1.1 VISSIM.....	22
3.1.2 Streckenaufbau.....	24
3.1.3 Verkehrszuflüsse und Verkehrszusammensetzung.....	25
3.1.4 Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge.....	28
3.1.5 Fahrverhalten SAE level 0.....	29
3.1.6 Fahrverhalten SAE level 4.....	33
3.2 Fahrsimulator.....	35

3.3	Probandenstudie	36
4	Datenauswertung des subjektiven Befindens	39
4.1	Soziodemographie und Mobilitätsverhalten.....	39
4.2	Fahrverhaltensbewertungen der Simulationsszenarien	41
4.3	Allgemeine Fragen zum Fahrsimulator.....	47
4.4	Allgemeine Fragen zum automatisierten Fahren	49
5	Software zur Datenanalyse der objektiven Kenngrößen.....	50
5.1	Struktur der Auswertungssoftware	52
5.2	Vorbereitung der Daten für die Auswertung	53
5.2.1	Steuerungsskript.R – steuerndes Skript	53
5.2.2	Surrounding.R – Datenreduzierung.....	55
5.2.3	Diagramms.R – Vorbereitungen für die ersten Auswertungen und die Erstellung erster Übersichtsdiagramme	61
5.3	Auswertung des Längsverhaltens.....	61
5.3.1	follow.R – Analyse des Folgeverhaltens.....	61
5.3.2	fahrdyn_Kenngroessen.R – Berechnung d. fahrdynamischen Kenngrößen	63
5.4	Auswertung des Querverhaltens.....	64
5.4.1	LC.R – Vorbereitung der detaillierten Auswertung und Erstellung erster Umgebungsgrafiken bei den Fahrstreifenwechseln des Ego-Fahrzeugs.....	64
5.4.2	timeframe.R – Analyse der Zeitspannen zwischen dem Aufkommen eines FS-Wechsel-Wunsches, dem protokollierten FS-Wechsel und dem Abschluss des FS-Wechsels.....	67
5.4.3	LC_Evaluation.R – Analyse der Zeitspanne zwischen dem Entschluss zum FS-Wechsel und dem protokollierten FS-Wechsel, sowie der Abstände zu den VISSIM-Fahrzeugen im Zeitpunkt des Entschlusses.....	69
5.5	Ergänzende Operationen und Grafikerstellungen.....	71
5.5.1	Boxplots.R – Grafische Darstellung der fahrdynamischen Kenngrößen	71
5.5.2	follow_Plots.R – Auswertung und grafische Darstellung der Folgeverhalten.....	71
5.5.3	LC_Plots.R – Auswertung und grafische Darstellung einzelner Fahrstreifenwechselverhalten.....	73
6	Ergebnisse.....	74
6.1	Folgeverhalten.....	74
6.1.1	Gesamtfahrt	74
6.1.2	Folgefahrten	81
6.2	Fahrstreifenwechselverhalten.....	91
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	102
8	Glossar	106
9	Literaturverzeichnis	108

10 Anhang	111
10.1 Folge- und Fahrstreifenwechselfparameter für VISSIM	111
10.1.1 PKW im Szenario SAE 0	111
10.1.2 LKW im Szenario SAE 0	112
10.1.3 PKW im Szenario SAE 4 mit 0,9 Sekunden Sicherheitsabstand	113
10.1.4 LKW im Szenario SAE 4 mit 0,9 Sekunden Sicherheitsabstand	114
10.1.5 PKW im Szenario SAE 4 mit 1,8 Sekunden Sicherheitsabstand	115
10.1.6 LKW im Szenario SAE 4 mit 1,8 Sekunden Sicherheitsabstand	116
10.2 Permutation der Fahrverhalten in der Probandenstudie	117
10.3 Probandenfragebogen	118
10.3.1 Fragen zur Soziodemographie und zum Mobilitätsverhalten	118
10.3.2 Fahrverhaltensbewertung der Simulationsszenarien	119
10.3.3 Fragen zum Fahrsimulator	121
10.3.4 Fragen zum automatisierten Fahren	122
10.4 Ergänzende grafische Darstellungen der Fragebogenauswertungen	123
10.4.1 Probandenakquirierende Stellen	123
10.4.2 Soziodemographische Verteilungen	123
10.4.3 Allgemeine Fragen zum automatisierten Fahren und Fahrassistenzsystemen	125
10.5 Auszüge aus dem R-Code	127
10.5.1 follow.R	127
10.5.2 timeframe.R	130
10.5.3 Boxplots.R	133
10.5.4 follow_Plots.R	134
10.5.5 LC_Evaluation.R	136
10.5.6 Zusammenhang_Fahrdauer-Startposition.R	140
10.6 Untersuchtes Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge	142
10.6.1 Folgeverhalten bei Kolonnenbildung	142
10.6.2 Abweichungen vom gewünschten Fahrverhalten der VISSIM-Fahrzeuge bei Einspeisung eines externen Fahrverhaltens	143