



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

FAKULTÄT FÜR MASCHINENWESEN

LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE

UNTERSUCHUNGEN ZUM INTERAKTIONSVERHALTEN
URBANER VERKEHRSTEILNEHMER

Christian Lehsing

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
2. Prof. Dr.-Ing. Matthias Rötting

Die Dissertation wurde am 21.02. 2019 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 27.08.2019 angenommen.

Meiner Familie

„Ich bin jemand, weil Du jemand bist.“

(Afrikanisches Sprichwort)

Danksagung

Allen voran gilt mein Dank meinem Doktorvater Prof. Klaus Bengler. Mit der Anstellung an seinem Lehrstuhl begann der lang gehegte Wunsch und das Abenteuer Promotion. In vielen Gesprächen zur Dissertation wurde er seiner Betreuungspflicht mehr als gerecht. Die Arbeit am Lehrstuhl für Ergonomie ist anspruchsvoll und zeitintensiv, erlaubt aber auch vielfältige Einblicke ins Wissenschaftlerleben, mit Experimenten, Lehre, Forschungsfinanzierung, Betreuung des Studienganges Human Factors Engineering, Konferenzreisen und Forschungsaufenthalten im Ausland – ein heterogenes und gelungenes Rundumpaket.

Während meiner Zeit am Lehrstuhl haben mich viele Studentinnen und Studenten im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten und Projekte unterstützt. Euch gilt ebenso mein Dank, da viele der Studien und die daraus entstandenen Publikationen, auf denen diese Dissertation basiert, in dieser Qualität ohne euch nicht möglich gewesen wären.

Den über die Jahre kennengelernten Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl möchte ich für das sehr soziale Miteinander danken und für das tolle und entspannte Arbeitsklima. Insbesondere Ilja Feldstein, mit dem ich zum Ende der Promotion den USA-Aufenthalt in Boston vorbereitete und durchführte - danke für den Impuls.

Mein Dank geht auch an Prof. Alex Bowers und Dr. Steven Savage vom Schepens Eye Research Institute der Harvard Medical School für die intensive internationale Zusammenarbeit über die letzten Jahre hinweg und die Möglichkeit meine Forschungsansätze mit euren verschränken zu dürfen. Gleiches gilt für Prof. Pawan Sinha, Annie Cardinaux, Dr. Sharon Gilad-Gutnick vom Brain and Cognitive Science Department des Massachusetts Institutes of Technology sowie Frau Dr. Dipl.-Psych. Christine Falter-Wagner (LMU) für die Möglichkeit, meine Ansätze auf neue Gebiete anwenden zu dürfen und die interessante Kollaboration im Autismus-Projekt.

Es hat mich zudem sehr gefreut, dass Prof. Dr.-Ing. Matthias Rötting (TU Berlin) sich bereit erklärt hat, das Zweitgutachten zu übernehmen. Als Alumni des Human Factors Studienganges in Berlin wurden dort die akademischen Grundlagen für meine Münchner Zeit gelegt.

Herrn Dr. Dietrich Manstetten (Robert Bosch GmbH) danke ich für das Mentorat während der Promotion.

Auch meinen Eltern, Andrea und Bernd, möchte ich meinen Dank aussprechen. Sie haben mich, egal wann und wo, ideell und finanziell unterstützt und meine Ausbildung weit über das Studium hinaus mitgetragen und gefördert.

Schlussendlich gilt der größte Dank meiner Familie, allen voran meiner Partnerin Melanie, die mich jahrelang mit Engelsgeduld unterstützt und ihre eigene Karriere in dieser Zeit zurückgestellt, sich liebevoll um unsere drei Kinder Bennet, Jasha und Olivia gekümmert und die unterschiedlichsten Launen meinerseits ertragen hat. Danke!

Kurzfassung

Im Bereich der Verkehrs- und Fahrverhaltensforschung wird die Fahrsimulation seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich als Untersuchungsumgebung genutzt. Fahrverhalten und Verkehrskonflikte sowie deren Ursachen können so in einer sicheren Umgebung untersucht und mögliche Gegenmaßnahmen evaluiert werden. Darüber hinaus wird die Fahrsimulation heutzutage eingesetzt, um neuartige Fahrerassistenz- und -informationssysteme bereits entwicklungsbegleitend zu untersuchen. Der Mensch als Operator im Fahrerarbeitsplatz bringt dabei seine intra- und interindividuellen Eigenschaften, physiologisch wie kognitiv, mit in dieses Spannungsfeld aus Verkehr und Verkehrsmittel ein. Er trägt damit dazu bei, dass einerseits die Wechselwirkungen zwischen Mensch und Maschine aber andererseits auch zwischenmenschlich eine Herausforderung für das System Verkehr bleiben. Die Erforschung von Fahrverhalten und daraus resultierenden Verkehrskonflikten mittels des klassischen Ansatzes des Einpersonenversuches im Fahrsimulator ist jedoch im Hinblick auf die externe Datenvalidität unzureichend.

Um den in der Realität vorherrschenden interindividuellen Verhaltensanpassungen entsprechend gerecht zu werden, wird in der vorliegenden Arbeit der Ansatz der vernetzten Fahrsimulation vorgestellt und dessen Einsatz in der Untersuchung sozialer Interaktion in ausgewählten urbanen Verkehrssituationen beschrieben. Ein Untersuchungsschwerpunkt lag hierbei auf der Begegnung von Autofahrern und Fußgängern, als schwächstes Glied im Verkehrsgeschehen. Aufgrund der Dominanz der visuell zu erfassenden Informationen während des Fahrens war der Einfluss sehbeeinträchtigter Fahrer auf das Interaktionsverhalten zusätzlich Teil der Untersuchungen. Die entsprechende Studie trägt somit dem bekannten fahrerseitigen demografischen Wandel Rechnung. Parallel dazu wird in der Arbeit auf geeignete Analyseverfahren eingegangen, da die klassischen Verfahren der Fahrverhaltensforschung an dieser Stelle nicht sensitiv genug waren, die zwischenmenschlichen Verhaltensanpassungsprozesse und mögliche Konfliktursachen zu quantifizieren und qualifizierte Aussagen im Hinblick auf das Zusammenspiel zu liefern.

Im Rahmen dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass der Ansatz der vernetzten Fahrsimulation dazu geeignet ist, grundlegende Verhaltensaspekte bei den Versuchsteilnehmern zu ermöglichen, welche einer sozialen Interaktion im Realverkehr deutlich näherkommen als der klassische Ansatz der nicht-vernetzten Fahrsimulation mit nur einem involvierten Menschen. Zudem konnte gezeigt werden, dass die neuartig eingesetzten Analyseverfahren der Interaktionsquantifizierung sehr gut geeignet sind, die Anpassungsprozesse zwischen den beiden Verkehrsteilnehmern Fahrer und Fußgänger zu erfassen.

Abstract

In traffic conflict and driving behavior research, driving simulation is a successful method, which is used since decades. The underlying aspects of driving behavior and traffic conflicts can be analyzed in a safe environment. Nowadays, it is also applied to analyze future driver assistance and information systems in early stages of their development. Thereby, a premature identification of critical system and driver relevant issues is possible. Now, the human being as the operator of the vehicle brings in his intra- and interindividual characteristics, physiologically and cognitively, to this conflict area of traffic and modes of mobility. Doing so, he contributes to the challenges that interactions between man and machine, as well as between human beings are for the traffic system itself and the research on driving behavior and resulting conflicts between road users. Research on this usually deploys single-subject studies, which in terms of ecological validity lack the concept of social interaction to some extent.

To account for the interindividual behavior adaption processes in real traffic, this thesis presents the approach of linked driving simulation and its application to investigate social interaction in selected urban traffic situations. The studies focused on situations with vulnerable road users such as pedestrians and motorcyclists in interaction with vehicles and their drivers. Due to the dominance of the visual perception, regarding traffic relevant information, one studies tested the effects of visually impaired drivers on the interaction behavior. Hence, this study paid attention to the demographic change among the population of drivers. Further, it is shown how to analyze the behavior adaption process between the two of them, as classical analyzing methods have their limitations concerning the quantification of time related adaption processes and possible conflicts between two road users.

Within the scope of this thesis it is shown, that the approach of linked driving simulation is able to induce crucial aspects of social interaction among the participants in the studies. In contrast to the classical approach with one human participant and pre-programmed artificial traffic agents, where a more reactive behavior was observed.

Additionally, the novel methods to analyze traffic data in terms of interactive behavior, proofed to be sensitive for the mutual adaption processes between different types of road users.

Folgende Veröffentlichungen stellen die Basis für die vorliegende Arbeit dar (in chronologischer Reihenfolge):



Lehsing, C., Kracke, A., & Bengler, K. (2015). Urban perception – a cross-correlation approach to quantify the social interaction in a multiple simulator setting. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 1014-1021). IEEE. DOI: 10.1109/ITSC.2015.169.

Lehsing ist der Hauptautor der Veröffentlichung. Kracke unterstützte in der Datenauswertung und -analyse sowie in der Diskussion der Ergebnisse. Bengler unterstützte die Veröffentlichung hinsichtlich Methodik und Überarbeitung des Manuskriptes.



Lehsing, C., Benz, T., & Bengler, K. (2016). Insights into interaction-effects of human-human interaction in pedestrian crossing situations using a linked simulator environment. *IFAC-PapersOnLine*, 49(19), 138-143. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.475.

Lehsing ist der Hauptautor der Veröffentlichung. Bei der Datenerhebung und -auswertung unterstützte Benz. Bengler leistete Unterstützung beim Studiendesign und bei der Überarbeitung des Manuskriptes.



Lehsing, C., Fleischer, M., & Bengler, K. (2016). On the track of social interaction – A non-linear quantification approach in traffic conflict research. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 2046-2051). IEEE. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795887.



Lehsing ist der Hauptautor der Veröffentlichung. Fleischer unterstützte bei der Datenerhebung und -auswertung. Bengler unterstützte bei Überarbeitung des Manuskriptes.








Lehsing, C., Ruch, F., Kölsch, F.M., Dyszak, G.N., Haag, C., Feldstein, I.T., Savage, S.W. & Bowers, A.R. (2019). Effects of Simulated Mild Vision Loss on Gaze, Driving and Interaction Behaviors in Pedestrian Crossing Situations, *Accident Analysis & Prevention*, 125, 138-151, DOI: 10.1016/j.aap.2019.01.026.

Lehsing ist der Hauptautor der Veröffentlichung. Ruch unterstützte bei der Datenerhebung und -auswertung. Kölsch und Dyszak unterstützten bei der Erstellung des Studienmaterials, Haag und Feldstein bei der Einrichtung der Hardware, Savage und Bowers bei der Datenanalyse und Überarbeitung des Manuskriptes.

Veröffentlichungen zu den unterstützenden Studien

-  Walz, M., **Lehsing, C.**, Bengler, K., Will, S., & Sich, M. (2017). Impacts of an Intersection Assistance System: Social Interaction between Drivers and Motorcyclists. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering* (pp. 279-286). ACM. DOI: 10.1145/3057039.3057077.
-  Feldstein, I.T., **Lehsing, C.**, Dietrich, A. and Bengler, K. (2018). Pedestrian simulators for traffic research: state of the art and future of a motion lab, *Int. J. Human Factors Modelling and Simulation*, 6(4), pp.250–265. DOI: 10.1504/IJHFMS.2018.096128.

Zusätzliche Veröffentlichungen aus dazugehöriger Forschung:

-  Song, Y. E., **Lehsing, C.**, Fuest, T., & Bengler, K. (2018). External HMIs and Their Effect on the Interaction Between Pedestrians and Automated Vehicles. In *International Conference on Intelligent Human Systems Integration* (pp. 13-18). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-73888-8_3.
-  **Lehsing, C.**, & Feldstein, I. T. (2018). Urban Interaction–Getting Vulnerable Road Users into Driving Simulation. In *UR: BAN Human Factors in Traffic* (pp. 347-362). Springer Vieweg, Wiesbaden.
-  Mühlbacher, D., Preuk, K., **Lehsing, C.**, Will, S., & Dotzauer, M. (2018). Multi-Road User Simulation: Methodological Considerations from Study Planning to Data Analysis. In *UR: BAN Human Factors in Traffic* (pp. 403-418). Springer.
-  Bowers AR, Hoelzl R, Steckhan L, Herzog O, Savage SA, **Lehsing C.** (2019). Pilot study of a tactile hazard warning device for drivers with hemianopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 60. ARVO E-abstract *Accepted*.
-  Xu J, Emmermann B, Herzog O, Swan G, **Lehsing C.**, Bowers AR. (2019). Pilot study of an auditory scanning reminder system for drivers with hemianopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 60. ARVO E-abstract *Accepted*.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	12
1.1	Hintergrund und Motivation.....	14
1.2	Soziale Interaktion	15
1.2.1	Soziale Interaktion im Straßenverkehr	16
1.2.2	Beeinträchtigungen sozialer Interaktion.....	17
1.3	Die Fahrsimulation als Untersuchungsumgebung	18
1.3.1	Aktuelle Limitation der Fahrsimulation.....	19
1.4	Forschungsfragen und Lösungsansatz.....	20
1.4.1	Forschungsfragen	21
1.4.2	Lösungsansatz.....	21
1.5	Einschränkungen.....	25
1.6	Aufbau der Arbeit.....	26
2	Insights into Interaction – Effects of Human-Human Interaction in Pedestrian Crossing Situations using a linked Simulator Environment	28
3	Urban Perception – A Cross-Correlation Approach to Quantify the Social Interaction in a Multiple Simulator Setting.....	30
4	On the Track of Social Interaction-A Non-Linear Quantification Approach in Traffic Conflict Research.....	32
5	Effects of Simulated Mild Vision Loss on Gaze, Driving and Interaction Behaviors in Pedestrian Crossing Situations	34
6	Synthese und Reflexion.....	36
6.1	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse.....	36
6.2	Diskussion der Untersuchungsmethode	40
6.3	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	41
6.4	Beantwortung der Forschungsfragen.....	44
6.5	Allgemeine Empfehlungen für anschließende Studien.....	45
	Anhang	46
	Literaturverzeichnis.....	58

1 Einleitung

Mobilität bedeutet Unabhängigkeit und das generationenübergreifend (Schwanen & Ziegler, 2011). Sei es zu Fuß oder mit dem Fahrrad, motorisiert mittels Motorrad, PKW oder Ähnlichem. Zusammengefasst bildet diese Individualmobilität der Einzelnen das Verkehrssystem als Ganzes. Um das Miteinander unterschiedlichster Verkehrsteilnehmer sicher, konfliktfrei und effizient zu gestalten, wurden entsprechende Gesetze verabschiedet und Richtlinien entworfen. Eine dieser Vorschriften ist die Straßenverkehrsordnung (StVO). Bereits im ersten Paragraphen, Absatz 1 wird darauf hingewiesen, dass diejenigen, die am Straßenverkehr teilnehmen, eine ununterbrochene Vorsicht sowie gegenseitige Rücksicht walten lassen sollen (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2018). Stark damit assoziiert sind die Begriffe Aufmerksamkeit und Verhaltensanpassung, denn wer unaufmerksam am Verkehr teilnimmt, gefährdet sich und andere Teilnehmer. Gleichermaßen verhält es sich mit der Adaption des eigenen Verhaltens in Bezug auf das anderer. Eine Nichtanpassung kann in diesem Fall zu kritischen Situationen führen, welche in einem Verkehrskonflikt münden. Eine Unterscheidung in formale, gesetzlich geregelte Normen und informell, sozial geregelte Normen nahm Deehy (1968) vor. Wilde verfeinerte diese Annahme acht Jahre später und identifizierte vier Verhaltensmuster unter dem Aspekt, ob das jeweilige Normsystem (formal vs. informell) bei den Manövern zweier Verkehrsteilnehmer zum Tragen kommt. Als konfliktbehaftet definiert Wilde die Situationen, in denen beide Systeme beachtet werden, und jene, in denen das formale System unbeachtet bleibt jedoch das informelle angewandt wird (Wilde, 1976).

Internationale und nationale Unfallstatistiken zeigen, dass es trotz Gesetzgebung (StVO, Fahrschulpflicht) und Verkehrserziehungsmaßnahmen (z.B. Fahrradführerschein im Schulalter, Auffrischkurse, Verkehrssicherheitstage, Gremienarbeit) zwar rückläufige, aber immer noch zu viele Verkehrsunfälle weltweit und auch auf deutschen Straßen gibt. So sind knapp ein Viertel (23%) der Verkehrstoten global Fußgänger (World Health Organization, 2018). Ca. 27% der Verkehrstoten, die in Europa umkommen, waren zu Fuß unterwegs, in Deutschland waren es 2017 15% der Verkehrsteilnehmer (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018). Beachtenswert dabei ist der Umstand, dass bei nur 3% der Fälle die Konflikursache falsches Fußgängerverhalten ist (Verband für bürgernahe Verkehrspolitik e.V., 2018b).

Ursachen für die Entstehung von kritischen Situationen bis hin zu Unfällen untersucht beispielsweise die Fahrverhaltens- und Verkehrskonfliktforschung. Berkel (1997) definiert dabei einen Konflikt durch zwei Elemente, die zur gleichen Zeit nicht vereinbare oder entgegen gerichtete Handlungen ausführen wollen. So sind zum einen die Elemente (Verkehrsteilnehmer) und ihre Eigenschaften und zum anderen deren Handlungen dabei von besonderem Interesse. Zu den verkehrsrelevanten Eigenschaften zählen hier beispielsweise die physiologische und kognitive Leistungsfähigkeit, das Alter, das Geschlecht oder die Erfahrung als Verkehrsteilnehmer (auch in verschiedenen Rollen).

Eine Methode zur Erforschung von Verkehrskonflikten und Fahrverhalten, welches dazu führen kann, ist die Fahrsimulation (Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2017). Diese wird seit den 60er Jahren (Blana, 1996) erfolgreich eingesetzt, um das Verhalten (und dessen Anpassung oder Nicht-Anpassung) der Akteure in den unterschiedlichsten Szenarien und Verkehrssituationen zu analysieren. Aufbauend auf den Ergebnissen werden, wo nötig, Gegenmaßnahmen entwickelt, die die Anzahl der Verkehrstoten reduzieren, die Schwere von Unfällen mindern und die Kritikalität von verkehrlichen Begegnungssituationen herabsetzen soll. Die Vorteile dieser Untersuchungsmethode liegen in der gefahrlosen, standardisierten und wiederholbaren Durchführung von Studien mit den unterschiedlichsten Fragestellungen. Zentraler Bestandteil sind der Fahrsimulator, der Proband mit einer definierten Fahraufgabe, die entsprechenden Stimuli zur Herstellung der potenziell kritischen Fahrsituation sowie die Verkehrsumgebung mit Infrastruktur und Umgebungsverkehr.

Einen wesentlichen Kritikpunkt bei dieser Vorgehensweise stellt die ökologische Validität, als das Ausmaß der Übereinstimmung von kontextuellen Bedingungen der Untersuchungsumgebung mit der alltäglichen Realität, der Ergebnisse dar und gilt damit als essenzielle Voraussetzung für die Anwendung der Studienergebnisse auf die natürliche Umgebung der Versuchsteilnehmer (Krause, 2015; Neisser, 1976; Schmuckler, 2001). Neben Reliabilität und Objektivität ist die ökologische Validität ein ausschlaggebendes Gütekriterium empirischer Erhebungen, welches sich bei Nichtbeachtung direkt proportional auf die Belastbarkeit der Untersuchungsergebnisse auswirkt. Da die Fahrsimulation als Computersoftware lediglich einen gewissen Abstraktionsgrad der Realität darstellen kann, nie aber die Realität an sich, sehen Kritiker im Fahrverhalten von Versuchsteilnehmern auch nicht deren reales Verhalten, welches sie im echten Straßenverkehr zeigen würden. Gerade in Bezug auf das Interaktionsverhalten zwischen menschlichem Fahrer und modellbasiertem Umgebungsverkehr wird dies deutlich. Demnach seien die Ergebnisse, welche Fahrsimulatorstudien liefern, weniger belastbar, eher eine Tendenz in Richtung der auslösenden Faktoren von bestimmtem Verhalten, Verkehrskonflikten oder auch Unfällen, und daher umstritten (Mullen, Charlton, Devlin, & Bedard, 2011).

Mit Untersuchungen zur vernetzten Fahrsimulation, also der physikalischen und informationstechnischen Verschaltung zweier Simulatoren, will die vorliegende Arbeit dazu beitragen, einen Ansatz zu liefern, der die ökologische Validität solcher Studien steigert. Denn indem sich zwei oder mehrere Menschen in derselben virtuellen Welt begegnen, soll das Verhalten während der Fahrt und die Interaktion in kritischen Situationen natürlicher und vor allem realistischer sein. Auch die Anpassung an die virtuellen Gegebenheiten, sowie seinem Gegenüber, soll menschlicher, sozialer und damit valider erfolgen.

Dieser Ansatz erfordert unter Umständen andere, interaktionssensitive Analyseverfahren, welche ebenfalls in der Arbeit vorgestellt werden. Diese sollen die zwischenmenschlichen Verhaltensanpassungsprozesse operationalisieren, somit quantifizierbar und damit vergleichbar machen.

1.1 Hintergrund und Motivation

Die Nutzung von Fahrsimulatoren mit unterschiedlichem Realitätsgrad ist ein weit verbreiteter Forschungsansatz. Dabei fährt ein Proband mit einer vorgegebenen Fahraufgabe in einem Fahrsimulator. Dieser besteht neben dem Simulatorenaufbau (engl. Mockup), aus der Computerhardware und der Fahrsimulationssoftware¹. In der Software ist nahezu eine unbegrenzte Anzahl an Szenarien und Situationen umsetzbar. Landstraßen, Autobahnen, Stadtgebiete, Winterzeit, Sommerzeit, Tages- oder Nachtfahrt, wenig oder mehr Umgebungsverkehr, Fußgänger, Rad- und Motorradfahrer, PKWs, LKWs, statische und dynamische Objekte sind hierbei implementierbar. Die Interaktion zwischen Proband und anderen Verkehrsteilnehmern ist jedoch begrenzt. Der Umgebungsverkehr wird durch hinterlegte Modelle (z.B. Helbing & Molnar, 1995; Wiedemann, 1974) gesteuert, welche deren Verkehrsverhalten festlegen. Gerade letzteres steht im starken Widerspruch zur natürlichen Interaktion zwischen menschlichen Akteuren im Verkehrsgeschehen, da bei der Definition von Modellen immer Kompromisse im Hinblick auf die Freiheitsgrade des modellierten Gegenstands gemacht werden (Bossel, 1992). Verkehrsverhalten wird zwar über Gesetze und Richtlinien geschult und mehrheitlich geregelt, beherbergt aber dennoch ein hohes Ausmaß an inoffiziellen Regeln (Deehy, 1968), welche die Verkehrsteilnehmer teils bewusst, teils unbewusst nutzen, um möglichst sicher, effizient und komfortabel durch den Verkehr zu gelangen. Die Abbildung dieser zuletzt genannten Verhaltensweisen in Modellen ist nur bedingt oder gar nicht möglich, da inter- und intraindividuelle Unterschiede in der Gewichtung dieser Verhaltensweisen möglich sind.

Es ist daher das erklärte Ziel dieser Arbeit zu untersuchen, wie die dynamische und wechselseitige, teils inoffiziell geregelte, zwischenmenschliche Interaktion im Rahmen von Fahrsimulatorstudien berücksichtigt werden kann.

Dabei wird das Verhalten von Autofahrern in zwei Arten der Fahrsimulation untersucht, erfasst, operationalisiert und quantifiziert, um in den Situationen, die dem Fahrer in den Versuchsfahrten präsentiert werden, verglichen werden zu können. Das Interaktionsverhalten des Fahrers, sowie dessen Varianz aufgrund intra- und interindividueller Schwankungen, steht im Mittelpunkt der Betrachtungen. Denn gerade in der Verkehrskonfliktforschung spielt ebenjenes Verhalten der untersuchten Verkehrsteilnehmer und dessen Ursachen eine übergeordnete Rolle für die Aussagekraft der Resultate. Untersucht man die Ursachen für Verkehrskonflikte, welche auf Basis von körperlichen oder kognitiven Beeinträchtigungen oder auch durch Fehlverhalten eines oder mehrerer Verkehrsteilnehmer entstehen können, so bedarf es Methoden, die eine möglichst valide, auf Alltagssituationen übertragbare, Untersuchung dieses Verhaltens begünstigen. Damit soll sichergestellt werden, dass die Ergebnisse aus derart Studien einer kritischen Überprüfung standhalten und überzeugend auf ihre Ursachen zurückzuführen sind.

¹ Im Rahmen der Studien vorliegender Arbeit wurde mit der Software SILAB (Version 5.1) des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW GmbH, Veitshöchheim) gearbeitet.

1.2 Soziale Interaktion

In seinem 1890 erschienen Werk „Über sociale Differenzierung: sociologische und psychologische Untersuchungen“ beschreibt Simmel erstmals den Begriff der Wechselwirkung (englisch: interaction) im soziologischen und psychologischen Kontext (Simmel, 1890). Er fasst damit die Abhängigkeiten und das gegenseitige aufeinander Einwirken von Individuen zusammen, was schlussendlich zur Bildung der Gesellschaft als Ganzes führt. Die Erweiterung um das Adjektiv ‚sozial‘ verdeutlicht dabei, dass es sich um zwischenmenschliche (Forgas, 1999) Wechselwirkungen handelt, also Handlungen, die zwischen zwei oder mehreren Menschen ablaufen. Eine Vielzahl von Autoren hat sich in den darauffolgenden Jahren und Jahrzehnten an dem Begriff der sozialen Interaktion als Verhaltensanpassungsprozess abgearbeitet und dabei Gründe, Voraussetzungen, Parameter, Einflussfaktoren und Ziele umfangreich und kritisch diskutiert.

Nachfolgend werden einige ausgewählte Beschreibungen zur sozialen Interaktion aufgeführt, um den theoretischen Rahmen dieses Begriffs darzulegen:

- „als regulatives Weltprinzip müssen wir annehmen, dass Alles mit Allem in irgend einer Wechselwirkung steht, dass zwischen jedem Punkte der Welt und jedem andern Kräfte und hin- und hergehende Beziehungen bestehen“ (Simmel, 1890, S. 13)
- „Dieses wechselseitige Reiz-Reaktions-Schema, dieses gegenseitige Sich-aufeinander-Einstellen, dieses sich wechselseitig bedingende Verhalten, indem die Aktivität des einen der Aktivität des anderen folgt bzw. von ihr angeregt wird, nennen wir Interaktion. Damit Interaktion überhaupt stattfinden kann, muss den Interaktionspartnern der gemeinte Sinn einer Handlung verständlich sein.“ (Fritz, Gabler, & Quitmann, 1975, S. 9)
- „(äußerlich sichtbares) wechselseitiges Aufeinanderwirken zwischen Individuen zum Zwecke der Abstimmung des Verhaltens der Beteiligten bzw. des konkreten Handelns der Kooperationspartner. Es ist die über psychische Tätigkeit wechselseitige Beeinflussung von Individuen innerhalb einer Gruppe. Damit wird Interaktion als ein Aspekt der sozialen Wechselwirkung bestimmt“ (Clauß et al., 1976, S. 259).
- „In der Alltagssprache versteht man unter Interaktion die aufeinander bezogenen Handlungen/Tätigkeiten/Bewegungen von zwei oder mehreren Subjekten (Personen/Tieren/Maschinen usw.). „Soziale Interaktion“ bedeutet, dass die aufeinander bezogenen Handlungen zwischen Subjekten stattfinden, die ein gemeinsames Verständigungssystem besitzen - also zwischen Menschen oder Tieren einer Art“ (Minsel & Roth, 1978, S. 15)
- „Die soziale Interaktion bezeichnet die umfassende, also nicht nur auf sprachlicher (Kommunikation) beruhende Wechselwirkung zwischen zwei oder mehreren Personen mit verhaltensbeeinflussender Wirkung. Um soziale Interaktion handelt es sich also, wenn zwei oder mehrere Personen ein Gespräch miteinander führen, aber ebenso, wenn z. B. ein Lehrer seine Schüler durch Gesten und Mimik zur Mitarbeit auffordert“ (Köck & Ott, 1997, S. 333)

- „Zur erfolgreichen Teilnahme an sozialer Interaktion gehört die Fähigkeit, das Verhalten anderer genau wahrzunehmen, zu interpretieren und vorherzusagen, und diesen anderen unsere Gedanken, Gefühle und Absichten mitzuteilen“ (Forgas, 1999, S. 3)
- „Human interaction is marked by the extensive use of nonnatural or conventionalized signs such as are characteristic of natural language semantics (Grice 1989). These are combined in complex ways with natural, nonarbitrary signs in order to produce layered, inferentially rich messages.“ (Enfield & Sidnell, 2018, S. 1)

Zusammenfassend ist soziale Interaktion demnach äußerlich sichtbares und dadurch wahrnehmbares, aufeinander bezogenes Handeln zwischen zwei oder mehreren Individuen. Sie bedarf dadurch eines gemeinsamen Wahrnehmungs- und Verständigungssystems. Ziel ist es, durch einen gemeinsamen und wechselseitigen Informationsaustausch, z.B. mittels sprachlicher Kommunikation oder visuell erfassbarer Gestik, eine Verhaltensabstimmung zwischen den involvierten Subjekten sicherzustellen.

Bei genauerer Betrachtung der Begriffsdefinitionen ist konsequent ersichtlich, dass Verhalten aufgrund von Information (vorrangig visueller Natur) angepasst werden soll. Klix beschrieb bereits 1971 jene Dialektik zwischen den beiden Konstrukten. Das Verhalten eines Systems erzeugt Information und im Umkehrschluss steuert Information das Verhalten von Systemen. Notwendig dazu ist jedoch, dass die Systeme (z.B. S_1 und S_2) dazu in der Lage sind, Informationen wahrzunehmen, zu erkennen und diese zu entschlüsseln (Voraussetzung 1, V_1). Die zweite Voraussetzung (V_2) neben der Informationsaufnahme- und entschlüsselung ist die Fähigkeit, dass das informationsempfangende System (z.B. S_1) auf unterschiedliche Informationen des informationssendenden Systems (z.B. S_2) auch differenziert reagieren kann, was eine Auswahl an verschiedenen Systemzuständen einschließt. Somit wird für eine erfolgreiche Interaktion eine aktive Anpassung und Einstellung des einen Systems (S_1) auf das andere (S_2) vorausgesetzt. (Klix, 1971)

Wird nun eine der beiden oder werden sogar beide Voraussetzungen V_1 oder V_2 nicht eingehalten, oder wird der Prozess der Informationsübermittlung beeinflusst (Weaver, 1949), so kann es zu einer gestörten Verhaltensanpassung, zu einer beeinträchtigten sozialen Interaktion kommen. Die daraus resultierende Situation wird als Konflikt bezeichnet. Hierbei versuchen zwei Elemente gleichzeitig ihre unterschiedlichen Interessen durchzusetzen und sind durch diese Tatsache eng miteinander vereint (Böhm, 2003).

1.2.1 Soziale Interaktion im Straßenverkehr

Überträgt man die in Kapitel 1.2 getroffenen Aussagen auf das Verkehrssystem, wird aus dem allgemeinen Begriff System (S_1 und S_2) der Verkehrsteilnehmer in seinen verschiedenen Rollen, die er im Gesamtsystem Verkehr einnehmen kann, unmotorisiert oder motorisiert. Die Informationen, die zwischen den Systemen ausgetauscht werden, sind auf der einen Seite Informationen über den Aufenthaltsort (Koordinaten) des

Systems und dessen zeitliche Änderung ausgedrückt über die Geschwindigkeit $v(t)$ und Beschleunigung $a(t)$, und auf der anderen Seite kommunikativer Natur. Die Kommunikation zwischen den Verkehrsteilnehmern dient größtenteils der Koordination untereinander (Juhlin, 2001) und kann dabei implizit oder explizit erfolgen. Die Teilnahme am Straßenverkehr wird generell als kooperativer Akt angesehen und als ebensolcher gesetzlich eingefordert (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2018). Hierbei teilen sich zeitweise unterschiedliche Parteien eine Ressource – die Straße. Aufgrund der Nutzung dieser verändern sie ständig die Rahmenbedingungen für die anderen Verkehrsteilnehmer, welche sich auf die neuen Gegebenheiten durch eine Verhaltensanpassung, z.B. durch Geschwindigkeitsreduktion oder Ortsveränderung, einstellen. Diese Anpassung verhindert Störungen des Verkehrssystems aber auch Fataleres. Hydén versuchte 1987 einen theoretischen Zusammenhang zwischen der Konfliktschwere und der Auftretenswahrscheinlichkeit von elementaren Verkehrereignissen herzustellen (siehe Anhang A). Betrachtet man die Unfallzahlen (2018: 3.285 Getötete, 309.000 Verletzte; ADAC, 2018) sowie die Anzahl zugelassener PKW in Deutschland (2018: 46,5 Mio.; Kraftfahrtbundesamt, 2018) scheint dies eine treffende Annahme zu sein, wenn auch nur qualitativ.

Die gegenseitige Rücksichtnahme, wie sie in der StVO gefordert wird (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2018), schreibt also per se eine Interaktion zwischen den Verkehrsteilnehmern vor. Die Art und Weise, wie diese Interaktion initiiert wird, welche Kommunikationskanäle dabei zur Verfügung stehen, ist begrenzt. Von außen betrachtet sind die meisten Verkehrsteilnehmer „physikalische Projektile“ (Juhlin, 2001, S. 9). Signale, die als Träger von Information dienen können (Klix, 1971), sind zum Beispiel die Blinker, das Aufblendlicht, Gesten, Kopfdrehungen und die Position des eigenen Fahrzeugs, des eigenen Körpers (z.B. als Fußgänger) auf der Straße. Die zeitliche Dimension der Interaktion kann dabei sehr kurz sein, manchmal reduziert sie sich auf einen Appell, das Setzen eines begrenzten Anreizes z.B. durch kurzes Stoppen eines Fußgängers am Gehweg mit Blick zum Fahrer signalisiert ihm, dass er erkannt wurde und der Fußgänger wartet (Juhlin, 2001). Unterstützt werden kann dies durch eine Winkgeste des Fußgängers. Parallel ausgeführt wird dafür weniger als 1 Sekunde benötigt, was bei einer Innerortsgeschwindigkeit von 50km/h jedoch schon einer Strecke von fast 14m entspricht.

1.2.2 Beeinträchtigungen sozialer Interaktion

Das Kommunikationsmodell von Shannon und Weaver (Weaver, 1949) definiert sechs Bestandteile eines Kommunikationssystems: die Informationsquelle (information source), den Sender (transmitter), eine Störquelle (noise source), den Kanal (channel), den Empfänger (receiver) und das Ziel (destination). Überträgt man diese Modellvorstellung auf das Verkehrssystem, so kann man vereinfacht annehmen, dass die Verkehrsteilnehmer jeweils die Informationsquelle und der Empfänger/das Ziel der zu übermittelnden Information sind. Zugleich können sie selbst, die Verkehrsteilnehmer, als Sender fungieren (z.B. Fußgänger macht Geste) oder das Fortbewegungsmittel das sie nutzen (z.B. PKW verzögert, gibt Lichthupe). Umwelteinflüsse wie Reflexionen oder

schlechte Sicht durch Nebel können Störquellen sein. Je nach Art der Information werden verschiedene Kanäle zur Übertragung genutzt. Im Verkehrssystem beschränken sich diese aber größtenteils auf den visuellen und akustischen Kanal, da bis zu 90% der fahrrelevanten Informationen über das visuelle System aufgenommen werden (Bubb, Bengler, Grünen, & Vollrath, 2015; Olson, 1996).

Neben den Umwelteinflüssen als Störquelle kann auch der Empfänger einer Information beeinträchtigt sein. Einerseits spielen physiologische, andererseits kognitive Beeinträchtigungen eine entscheidende, modulierende Rolle im Verkehr (Wilde, 1976). Auf physiologischer Seite hat eine Beeinträchtigung des visuellen Sinns den größten Einfluss. Kann eine entscheidende Information empfängerseitig nicht adäquat erkannt werden, ist eine signifikante Beeinflussung der Klix'schen Dialektik zwischen Verhalten und Information unausweichlich (vgl. Kapitel 1.2). Die das Verhalten steuernde Information wird nicht oder falsch erkannt und löst kein oder das falsche Verhalten (einen falschen Systemzustand) aus – die Entwicklung einer konfliktbehafteten Situation wird wahrscheinlicher. Zusätzlich zu den physiologischen Voraussetzungen spielen auch die kognitiven Prozesse eine wichtige Rolle. Der Abgleich mit Gelerntem (Fahrschule, Erfahrung als Verkehrsteilnehmer) und aktuell vorliegendem Verkehrsgeschehen erfordert eine spezielle kognitive Leistung – das Erinnern an verkehrsrelevantes Wissen, Regeln und Richtlinien und das Anwenden auf die aktuelle Situation – in sehr kurzer Zeit. Auch die Fähigkeit zur Perspektivenübernahme im Rahmen des interaktionistischen Rollenmodells (Krappmann, 2000) wirkt sich auf das Verkehrsgeschehen aus. Individuen sind in den meisten Fällen nicht nur Fußgänger oder Fahrer, ihre Rolle im Verkehr wechselt und sie kennen die verschiedenen Sichten, inklusive der Pflichten und Rechte, die aus der Rolle erwachsen, auf ein und dieselbe Situation und haben entsprechende Erwartungen darin. Ein Fußgänger beispielsweise am Zebrastreifen erwartet, dass die Fahrer ihn queren lassen und fordert sein Recht teilweise über hohe Fahrzeugverzögerungen stark ein, obwohl er in dieser Situation der schwächere und verletzlichere Partner ist, sich aber im Recht sieht (Färber, 2015; Kotte & Pütz, 2017).

1.3 Die Fahrsimulation als Untersuchungsumgebung

In der Fahrverhaltens- aber auch in der Verkehrskonfliktforschung werden verschiedene Werkzeuge eingesetzt, um menschliches Verhalten im Straßenverkehr zu analysieren. Maßgeblich sind das Zusammenspiel vom Fahrer mit dem ihn umgebenden Verkehr sowie ihn umgebenden technischen Systemen (z.B. Fahrerassistenz und Fahrerinformation) von Interesse. Insbesondere die Faktoren, die zu kritischen, das Menschenleben gefährdenden, Situationen führen, stehen im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Die Fahrsimulation als computergestützte, künstliche und die Realität abstrahierende Untersuchungsumgebung bietet der Forschung dabei die Möglichkeit, Verkehrssituationen mit Gefährdungspotential für die beteiligten Teilnehmer unter standardisierten, wiederholbaren und vor allem gefahrlosen Rahmenbedingungen detailliert zu betrachten.

Klassischerweise steht das Verhalten eines Versuchsteilnehmers, dem Fahrer, in Interaktion mit seiner Umwelt, im Mittelpunkt. Bei seiner experimentellen Fahrt begegnet er, je nach Untersuchungsgegenstand, anderen Verkehrsteilnehmern in der Simulation. Er kann hierbei durch Systeme informiert oder auch bei der Fahraufgabe unterstützt werden. Im Hinblick auf das Verhalten während der Fahrt ist der Fahrer durch seine jeweilige Fahraufgabe motiviert, durch die Gesetze und Richtlinien reguliert und in eine Umgebung inklusive Infrastruktur und andere Verkehrsteilnehmer integriert. Motivation, Regularien und Integration wirken sich auf das individuelle Verhalten und dessen Entwicklung über die Zeit aus.

Forschungsseitig werden in der Fahrsimulation Szenarien und Situationen umgesetzt, die z.B. aufgrund von erhöhten Unfallzahlen statistisch als kritisch oder konfliktbehaftet angesehen werden oder die wegen der Entwicklung eines neuen technischen Systems im automobilen Bereich in den Fokus rücken. So können neuartige Fahrerinformationssysteme oder -assistenzsysteme schon in sehr frühen Entwicklungsabschnitten in Kombination mit ihren späteren menschlichen Bedienern untersucht werden. Fehlentwicklungen in Bezug auf die Gebrauchstauglichkeit, Akzeptanz und vor allem Sicherheit bei der Benutzung können damit rechtzeitig identifiziert und entsprechend regulierende Aktionen eingeleitet werden (Wisselmann, Gresser, Spannheimer, Bengler, & Huesmann, 2004).

Neben dem Einfluss technischer Systeme auf das Verhalten des Fahrers haben dessen kognitive und physiologische Eigenschaften einen weiteren. Sie bestimmen maßgeblich, wie er seine Umwelt wahrnimmt und auf deren Änderungen reagieren kann. Untersuchungen mit psychologischem oder medizinischem Schwerpunkt sind neben oben genannten ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich für Fahrsimulatoren. (Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011)

1.3.1 Aktuelle Limitation der Fahrsimulation

Die ökologische Validität gilt als einer der stärksten Kritikpunkte, wenn es darum geht, die begrenzten Möglichkeiten künstlich erschaffter Welten aufzuzeigen, in denen sich der Mensch möglichst natürlich bewegen und interagieren soll. Diese Meinung zur Validität hat mehrere Ursachen, da die Nutzung von Fahrsimulatoren eine Vielzahl an unterschiedlichen Voraussetzungen mit sich bringt. Differenziert werden können hier technische Faktoren wie zum Beispiel der Simulatorenaufbau (als reduzierter Aufbau oder vollausgestattete Fahrzeugkarosse), wenn vorhanden, eine Bewegungsplattform zur Abbildung der Fahrzeugeigenbewegung (statischer vs. dynamischer Fahrsimulator), die Größe und Auflösung der grafischen Projektion (z.B. Monitore oder Beamer, HD oder 4k) oder das Audiosystem zur Präsentation der Eigen- und Umgebungsgeräusche (z.B. Kopfhörer oder Boxen, Stereo oder Surround-Sound). Zum anderen spielen informationstechnische Aspekte wie der Detaillierungsgrad der statischen und dynamischen Objekte der virtuellen Welt, der Realismus der Eigen- und Umgebungsgeräusche, aber auch die Verhaltensmodelle der anderen Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer, PKWs, LKWs etc.), die als Gesamtheit den Umgebungsverkehr bilden, eine Rolle. Letztere können über sogenannte mikroskopische

Verkehrsflussmodelle (z.B. Helbing & Molnar, 1995; Nagel & Schreckenberg, 1992; Twaddle, 2017; Wiedemann, 1974) beschrieben und in die Fahrsimulation integriert werden. In Helbings Social Force Modell (1995) sind beispielsweise zur Umsetzung von realistischem Fußgängerverhalten die Faktoren gewünschte Gehgeschwindigkeit, kürzester Weg zwischen Start und Ziel, Abstand zum nächsten Fußgänger und Abstand zu Wänden aufgenommen. Diese Faktoren werden zur Gesamtmotivation für das Fußgängerverhalten aufsummiert und um eine Fluktuation (zufällige Verhaltensvariation; z.B. rechts oder links um ein Objekt herumgehen) additiv erweitert. Ähnlich verhält es sich in den anderen genannten Modellen, die das Verhalten zwischen motorisiertem Verkehr betrachten. Entscheidend sind auch hier die Modellfaktoren Abstand zum Vorderfahrzeug, eigene Wunschgeschwindigkeit und das persönliche Sicherheitsbedürfnis, ausgedrückt durch einen Sicherheitsabstand, und was beim Unterschreiten desselben geschehen soll.

Die in Abschnitt 1.2 genannten Punkte zur sozialen Interaktion werden durch diese Modelle jedoch nur rudimentär berücksichtigt. Eine echte und umfassende, gegenseitige Anpassung des Verhaltens der modellierten Verkehrsteilnehmer aufgrund des Verhaltens anderer ist demnach nur in dem Maße möglich, in dem es im Modell berücksichtigt wurde (Modellfaktoren und Systemzustände) und dann durch die jeweiligen Agenten in der Simulation umgesetzt werden kann. Sind bestimmte Gesten oder Signale (z.B. Lichthupe) sowie deren Erkennung und Bedeutung fahrer- oder fußgängerseitig nicht implementiert (V_1), bringt es dem Fahrer in einer Fahrstudie nichts, den eben gesichteten Fußgänger freundlicherweise hinüber zu lassen (z.B. über Signale wie Lichthupe oder vollständiger Halt). Der Fußgänger erkennt diese Aktion oder das Signal schlichtweg nicht (V_1) und kann sein Querungsverhalten nicht anpassen (V_2). Gerade bei Situationen mit Interaktionspotenzial, wo es auf die Kooperation zwischen zwei oder sogar mehreren Verkehrsteilnehmern ankommt, sind die zwischenmenschlichen Aktionen unter Umständen sehr dynamisch, teilweise gerade noch wahrnehmbar und manchmal sogar ambivalent. Modelle können aufgrund ihrer Natur derartiges Verhalten und eine Anpassung darauf schwerlich realistisch umsetzen.

So sind Begegnungsvorgänge, welche besonders im städtischen Verkehr, wo nicht explizit geregelt, häufiger auf ein abgestimmtes Verhalten zwischen den unterschiedlichsten Verkehrsteilnehmern angewiesen, werden aber modellseitig ungenügend erfasst (Houtenbos, 2008; Reztsov, 2017; Richardson, 1984; Richardson, Joscelyn, & Saalberg, 1979; Saifuzzaman & Zheng, 2014; Taehyun, Lovell, & Park, 2003).

1.4 Forschungsfragen und Lösungsansatz

Die primäre Frage, die dieser Arbeit zugrunde liegt, beschäftigt sich mit der Methodik der vernetzten Fahrsimulation und wie diese die ökologische Validität von Simulationsuntersuchungen stärken kann (Forschungsfrage 1).

Forschungsfrage 2 zielt auf die erforderlichen Analysemethoden und Quantifizierungsmöglichkeiten sozialer Interaktion, als eine entscheidende Komponente

für ein sicheres und effizientes Verkehrssystem, ab, um Untersuchungsergebnisse entsprechend einordnen zu können.

Die dritte Forschungsfrage untersucht den laut Literatur wohl dominantesten fahrrelevanten Sinn und welchen Einfluss der Gesichtssinn und eine Beeinflussung dessen auf die Kritikalität und Interaktion zwischen Fahrern und Fußgängern hat (Forschungsfrage 3). Letztere Frage spielt unter dem Aspekt des demografischen Wandels (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2017) und ein damit einhergehender Anstieg älterer Fahrer mit reduziertem Visus (Carter, 1994) eine immer entscheidendere Rolle für das Verkehrssystem.

1.4.1 Forschungsfragen

Auf Basis der Vorbetrachtungen in den Kapiteln 1.1 - 1.4 ergeben sich die folgenden Forschungsfragen, die mit Hilfe der in Kapitel 2 - 5 veröffentlichten Publikationen systematisch beantwortet werden sollen:

- 1) *Wird durch die Vernetzung von Simulatoren die ökologische Validität von Fahrsimulationsversuchen zur Untersuchung von Fahrverhalten und Verkehrskonflikten gestärkt?*
- 2) *Welche Analyseverfahren und Metriken eignen sich, die sozial geprägten und zeitlich dynamischen Interaktionsprozesse in den untersuchten Fahrsituationen zu quantifizieren?*
- 3) *Welchen Einfluss hat eine Beeinträchtigung des Gesichtssinns auf das Blick-, Fahr- und Interaktionsverhalten in Fußgängerquerungssituationen?*

1.4.2 Lösungsansatz

Die vernetzte Fahrsimulation

Die vernetzte Fahrsimulation als Weiterentwicklung der klassischen, nicht vernetzten Fahrsimulation wurde dazu entwickelt, die zwischenmenschlichen Abstimmungsprozesse im Straßenverkehr realistischer und somit ökologisch valider in die virtuelle Umgebung zu integrieren bzw. diese zu ermöglichen. Hierbei werden zwei oder mehrere Simulatoren (z.B. LKW-, PKW-, Motorrad- oder Fußgängersimulator) physikalisch (über ein Rechnernetzwerk) verbunden. Die Simulationssoftware erlaubt die Einbindung und Steuerung von mehreren Verkehrsteilnehmern in derselben virtuellen Welt. So können bestimmte Situationen konstruiert werden, die durch die beiden Teilnehmer erlebt und aufgelöst werden. Die fahr- oder gehdynamischen Daten in den Situationen werden durch die Software gespeichert und können anschließend im Hinblick auf die Forschungsfragen ausgewertet werden.

2003 haben Hancock und de Ridder diesen Versuchsaufbau erstmals umgesetzt, um verschiedene Situationen (ein Kreuzungs- und ein Bergkuppen-Szenario) im Fahrsimulator zu untersuchen (Hancock & de Ridder, 2003). Hauptargument für die

Vernetzung war, dass die reziproken Handlungen der Fahrer und ein Einstellen auf dessen Gegenüber nicht korrekt wiedergeben und bewertet wird. Die Ergebnisse ihrer Studie in Bezug auf Kollisionsvermeidungsreaktionen (Lenkwinkel, Bremspedal- und Gaspedalaktivierung) zeigten sehr realistische Ausprägungen und sie betonten zusätzlich die Wichtigkeit der Zeit, in der sich die Fahrer gegenseitig sehen können, als kollisionsbeeinflussenden Faktor. Einen ähnlichen Ansatz nutzte Houtenbos wenige Jahre später, um das Interaktionsverhalten von PKW-Fahrern an Kreuzungen zu untersuchen und stellte das Konzept der Erwartung (z.B. wie sich andere Verkehrsteilnehmer verhalten, wie sich Situationen entwickeln werden) in den Mittelpunkt ihrer Forschung (Houtenbos, 2008). Weitere Studien unter Nutzung vernetzter Fahrsimulatoren, im Speziellen PKW-Simulatoren, wurden am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie beim Fahrsimulationssoftwarehersteller WIVW GmbH durchgeführt (z.B. Mühlbacher, Zimmer, Fischer, & Krüger, 2011; Schindler et al., 2011).

Will erweiterte diese Methode um einen weiteren Verkehrsteilnehmer – das Motorrad (Will, 2017; Will, Mark, Neukum, & Kaussner, 2014). In seinen Untersuchungen beschäftigte er sich maßgeblich mit der Sicherheit von Motorradfahrern in Verbindung mit speziellen Assistenzsystemen für diese Gruppe und der Entwicklung einer realistischen Motorradsimulation.

Schwerpunkt der Studien vorliegender Arbeit liegen auf der Untersuchung von Fußgängerquerungssituationen. Damit wird die Integration eines weiteren Verkehrsteilnehmers in die vernetzte Simulation erforderlich – die des Fußgängers. Am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität wurde dazu ein Fußgängersimulator entwickelt und aufgebaut (Feldstein, Dietrich, Milinkovic, & Bengler, 2016; Feldstein, Lehsing, Dietrich, & Bengler, 2018; Lehsing & Feldstein, 2018).

Allen Vernetzungsarten gemein ist die Möglichkeit, dass die beiden Versuchsteilnehmer, die sich in der virtuellen Welt begegnen, in Echtzeit miteinander interagieren können. Es kann jeweils über die entsprechenden Projektionssysteme das Verkehrsverhalten des anderen beobachtet und darauf durch Anpassung des eigenen Fahr- oder Gehverhaltens reagiert werden. Den Grundeigenschaften zur sozialen Interaktion aus Kapitel 1.2 wie äußerliche Sichtbarkeit, ein gegenseitiges Reiz-Reaktionsschema, aufeinander bezogenes Handeln, Einsatz von Gestik (beim Fußgängersimulator) zur Koordinierung des gemeinsamen Verhaltens wird damit Rechnung getragen. Die Basis zur Operationalisierung von Interaktion ist damit gelegt. Verschiedene Methoden, die die sozialen Prozesse messen und damit vergleichbar machen wollen, werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Operationalisierung sozialer Interaktion

„Verhalten zu messen ist von hoher praktischer Bedeutsamkeit, es sinnvoll zu messen herausfordernd.“ (Martin, Bateson, & Bateson, 1993, S. 1). Durch einige grundlegende Eigenschaften des Verkehrssystems respektive des Individualverkehrs wird dies jedoch ermöglicht. Motorisierte Verkehrsteilnehmer nutzen technische Systeme, um sich

fortzubewegen. Diese erzeugen über die Dauer ihrer Nutzung im Straßenverkehr physikalische Daten. Ort und Geschwindigkeit, sowie deren Ableitungen können zeitbasiert ausgewertet werden. Ebenso, auch wenn mit ungleich mehr Aufwand verbunden, verhält es sich mit nicht- motorisierten Verkehrsteilnehmern wie Fahrradfahrern und Fußgängern. Auch sie bewegen sich von ihrem Startpunkt zu einem Zielpunkt unter Nutzung verschiedener Infrastruktur (Radweg, Gehweg, Zebrastreifen). Diese Bewegung dauert Zeit, ist äußerlich sichtbar und kann von anderen wahrgenommen und interpretiert werden, zukünftiges Verhalten sogar regel- und wissensbasiert mit hohem Genauigkeitsgrad antizipiert werden. Das Verkehrsverhalten ist dabei Ausdruck vom innerem Verhalten, dem Verhalten des Fahrzeugführers, was nach außen sichtbar und damit messbar wird. Dabei ist das eigene Verhalten immer geprägt durch das anderer und unterläuft permanent kleineren und größeren Anpassungsprozessen aufgrund von wechselseitigen Beeinflussungen der Verkehrsteilnehmer, die sich begegnen (Swan & Owens, 1988).

Im Folgenden werden zwei Verfahren vorgestellt, die im Rahmen der klassischen Verkehrskonfliktforschung nach Wissensstand des Autors in dieser Art noch keine Anwendung fanden und diese um die Facette der sozialen Interaktion zwischen zwei Verkehrsteilnehmern erweitern soll. Es wird damit ermöglicht, neben den bekannten Kritikalitätsbetrachtungen durch Konfliktmaße wie Time-To-Collision (Minderhoud & Bovy, 2001), Post-Encroachment-Time (Cooper, 1984), Deceleration-to-Safety-Time (Hupfer, 1997) und deren Weiterentwicklungen, einen weiteren, wichtigen Bereich zu beleuchten. Dieser soll Aufschluss darüber geben, wie der lineare aber auch nichtlineare zeitliche Ablauf der Verhaltensanpassungen vonstattenging und welche Rolle die jeweiligen Konfliktpartner eingenommen haben.

Lineares Verfahren

Um die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen zwei Verkehrsteilnehmern zu quantifizieren, die im Verkehrssystem durch ihre motorisierte/nicht motorisierte Individualmobilität ihren Einfluss ausüben, wurde die Kreuzkorrelation (auch Produkt-Moment-Korrelation) zweier Signale (beispielsweise X und Y) nach Bravais und Pearson (Galton, 1888; Hartung, Elpelt, & Klösener, 2009; Pearson, 1920; Rodgers & Nicewander, 1988) gewählt (siehe Formel 1 und 2).

$$r(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{s_X s_Y} \text{ oder } \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \rho(X, Y) \quad (1)$$

mit

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{N - 1} \quad (2)$$

Diese bestimmt die Abhängigkeit oder auch korrespondierende Varianz zweier metrisch skaliertes Signale, auch wenn Sie zeitverschoben sind (Chatfield, 2013;

Yanovitzky & VanLear, 2008). In der vorliegenden Arbeit werden die beiden Geschwindigkeitssignale, als linear fortschreitende Zeitreihe, des jeweiligen Verkehrsteilnehmers (Fußgänger und Auto) korreliert. Über die zeitliche Verschiebung der Signale gegeneinander, in positiver sowie in negativer Richtung um je die halbe Signallänge $N/2$, wird die maximale (positive oder negative) Korrelation, Pearson's $r(X, Y)$, zwischen den beiden gesucht (Field, 2009). Dieses Vorgehen hat das Ausmaß an Korrelation zwischen den Signalen, den Kreuzkorrelationskoeffizienten, und die notwendige zeitliche Verschiebung (engl. lag) zur Erreichung der maximalen Korrelation als Ergebnis. Ersteres, normiert auf 1 (aufgrund der Division der Kovarianz $Cov(X, Y)$ beider Signale X und Y durch die jeweiligen Standardabweichungen s_X und s_Y), kann Werte zwischen +1 (perfekte positive Korrelation) und -1 (perfekte negative Korrelation) annehmen. Positive Korrelationen bezeichnen gleichläufige Signalkombinationen – beide Verkehrsteilnehmer beschleunigen oder verzögern. Negative Korrelationen stehen für gegenläufige Signalkombinationen – ein Verkehrsteilnehmer beschleunigt, der andere verzögert. Die dazugehörige Verschiebung wird, da es sich um das Geschwindigkeitssignal (m/s oder km/h) handelt, in Sekunden oder Stunden gemessen und steht in diesem Zusammenhang für die Reaktion des einen Verkehrsteilnehmers auf den anderen. Dieses Verfahren auf den Verkehrskontext angewandt erlaubt zudem, die Identifizierung der dominanten Zeitreihe, also dem dominanten Verkehrsteilnehmer, nach dem sich der andere richtet, und sein Verhalten (im vorliegenden Fall die Geschwindigkeit) anpasst. Eine Visualisierung des Vorgehens ist in Abbildung 5, der Veröffentlichung zu Kapitel, 5 enthalten.

Nichtlineares Verfahren

„Humans are nonlinear!“ (Trivedi, 01.-04.11.2016) Mit dieser Aussage beschreibt Professor Trivedi von der University of California das Verkehrsverhalten von Menschen und die Herausforderung, die z.B. der informationstechnischen Auslegung (Steuerungsalgorithmen) autonomer Fahrzeuge gegenübersteht. Jene Aussage steht im Kontrast zum vorher beschriebenen linearen Ansatz der Datenanalyse verkehrsdynamischer Daten. Unabhängig von dem einführenden Zitat wurde im Rahmen der Untersuchungen zu dieser Arbeit der Ansatz der Rekurrenzanalyse, genauer der Cross Recurrence Quantification Analysis (CRQA), angewandt (Casdagli, 1997; Eckmann, Kamphorst, & Rülle, 1987; Marwan, Romano, Thiel, & Kurths, 2007). Ziel war es, das Verhalten zweier Verkehrsteilnehmer (z.B. PKW und Motorrad oder PKW und Fußgänger) detaillierter, neben den linearen Zusammenhängen, auch auf nichtlineare Abhängigkeiten hin, zu untersuchen und diese, falls vorhanden, zu quantifizieren. Für die CRQA dienten ebenso die Geschwindigkeitssignale der beiden Verkehrsteilnehmer über die Zeit als Basis. Hier wurden am ehesten die Sichtbarwerdung von Verhaltensanpassung und die anschließende Wahrnehmung dieser, sowie die Reaktion darauf vermutet und ein Vergleich mit der zuvor genannten linearen Analyse wird ermöglicht. Die beiden Zeitreihen repräsentieren das jeweilige System, dem sie entspringen, und den Systemstatus in Bezug auf die Geschwindigkeit v zum jeweiligen Zeitpunkt t .

Bei einem System wird das Signal der zweidimensionalen Zeitserie $v_X(t)$ in einen Vektor $\vec{V}_X(t) = \{v_{X,0}(t), v_{X,1}(t), v_{X,2}(t), \dots, v_{X,i}(t), \dots, v_{X,m-1}(t)\}$ mit der Länge der Dimension m überführt. Im Vektor $\vec{V}_X(t)$ wird der aktuelle Zustand $v_{X,0}(t)$ und die $m - 1$ letzten Zustände $v_{X,i}(t) = v_X(t - i * \tau)$, welche mittels τ zeitversetzt sind, gespeichert. Somit sind die (Geschwindigkeits-)Zustände, welche miteinander verglichen werden, über die Variablen τ und m definiert. Tritt also ein (Geschwindigkeits-)Zustand $\vec{V}_X(j)$ in einem System X auf, der einem anderen Systemzustand $\vec{V}_X(i)$ innerhalb eines Fehlerintervalls ε_i ähnelt, wird dies als Rekurrenz (von lat. recurrere für „zurückkommen, wiederkehren“) bezeichnet. Die mathematische Bestimmung erfolgt über Formel 3.

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon_i - \|\vec{V}_X(i) - \vec{V}_X(j)\|), \quad \vec{V}_X \in \mathbb{R}^m, \quad i, j = 1, \dots, m \quad (3)$$

Werden jedoch zwei Systeme (X und Y) miteinander verglichen, beruht die Identifikation von wiederkehrenden Zuständen auf Formel 4 und man spricht von Cross Recurrence (CR).

$$CR_{i,j} = \Theta(\varepsilon_i - \|\vec{V}_X(i) - \vec{V}_Y(j)\|), \quad \vec{V}_X, \vec{V}_Y \in \mathbb{R}^m, \quad i, j = 1, \dots, m \quad (4)$$

Mittels der Formeln 3 oder 4 wird sich ähnelnden Systemzuständen über die Heaviside-Funktion Θ eine 1 innerhalb der Matrizen $R_{i,j}$ bzw. $CR_{i,j}$ zugewiesen, andernfalls eine 0. Zur Visualisierung der Matrizen dienen Rekurrenzplots, wobei jede 1 durch einen schwarzen Punkt (jede 0 durch einen weißen) repräsentiert wird (Beispiel: siehe Abbildung 5 oder 6 der Veröffentlichung zu Kapitel 4). Die schwarzen Punkte formen Strukturen, die die CRQA unter anderem auf Länge, Ausrichtung oder Verhältnis schwarzer zu weißer Fläche untersucht. Mehr als 15 Komplexitätsmaße beschreiben die nichtlinearen Zusammenhänge, unterschiedlich sensitiv für den jeweiligen Anwendungsfall, zwischen den beiden Systemen (Verkehrsteilnehmern). Beispiele hierzu sind: (1) wie oft gleiche Systemzustände vorkommen (Rekurrenzrate), (2) wie bestimmt die Systeme sind (Determinismus), (3) wie der Informationsgehalt ist (Shannon-Entropie), (4) wie die zeitliche Dauer parallel (synchron) verlaufender Prozesse ist (durchschnittlicher diagonale Linienlänge).

1.5 Einschränkungen

Die Untersuchungen beschränken sich auf die Quantifizierung sozialer Interaktion zwischen PKW-Fahrer und Fußgänger sowie PKW-Fahrer und Motorradfahrer. Dabei werden Aspekte wie der Fußgängertyp (programmiert oder menschlich gesteuert), die Querungsart (gerichtet und ungerichtet), Sehschärfe und Kontrastsensitivität des Fahrers oder der Assistenzgrad von PKW und Motorrad variiert. Es gelten dabei die grundlegenden Annahmen zur sozialen Interaktion aus Kapitel 1.2. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Simulationstechnik konnte einer der wichtigsten Aspekte der Interaktion nicht realisiert werden: der gegenseitige Blickkontakt zwischen den Verkehrsbeteiligten. In den Studien mit vernetzter Fußgängersimulation (Kapitel 2 - 5) wandte sich der Fußgänger zwar dem Fahrer zu und der Fahrer konnte Blickkontakt mit ihm aufnehmen, allerdings funktionierte das nicht in die Richtung des Fahrers, da die

grafische Repräsentation desselben sehr minimalistisch ausfiel und dieser hinter der Windschutzscheibe nicht erkennbar war. So konnten auch fahrerseitige Wink- oder Wischgesten, die dem Fußgänger sicheres Queren signalisieren sollten, nicht umgesetzt werden. Der Einsatz der Lichthupe als Ersatz war jedoch implementiert, wurde aber nur spärlich genutzt. Teilweise war die Ansteuerung des Fußgängers über Tastatur in der vernetzten Simulation anfällig, was sich in unnatürlichen Drehbewegungen der Fußgänger äußerte. Querungssituationen, die aufgrund dessen nicht dem Protokoll entsprachen, wurden aus der Datenanalyse entfernt. Die Validierung der Kreuzkorrelation anhand von Realdaten aus Querungssituationen konnte nicht durchgeführt werden. Ein Versuch, die Methode auf Realdaten anzuwenden, fand jedoch in der Arbeit von Fella (2018) eine vielversprechende Anwendung in einem Spurwechselszenario.

1.6 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in 6 Kapitel. Einführend werden in **Kapitel 1** Hintergrund und Motivation dargelegt. Darauf folgen theoretische Betrachtungen zur sozialen Interaktion, sowie Anwendungen und aktuelle Grenzen der Fahrsimulation als Forschungswerkzeug. Zusammengefasst wird dieser Abschnitt durch die Forschungsfragen und die Ansätze diese zu beantworten. Das **zweite Kapitel** zeigt eine klassische Analyse von Verhaltensdaten und deren Unzulänglichkeit in Bezug auf die Untersuchung zwischenmenschlicher Verhaltensprozesse. **Kapitel 3** thematisiert die Methode der Kreuzkorrelation als Ansatz zur Quantifizierung der sozialen Interaktion und stellt hierbei einen Vertreter der linearen Analyseverfahren dar. Der folgende Abschnitt, **Kapitel 4**, diskutiert einen neueren, nichtlinearen Ansatz zur Datenanalyse im Rahmen der Verhaltensforschung, die Rekurrenzanalyse. Der Einfluss visueller Beeinträchtigung seitens des Fahrers auf die Art, wie geschaut wird, auf das Fahrverhalten und wie der Fahrer mit Fußgängern interagiert, ist Thema des **5. Kapitels**. Die theoretischen Einführungen sowie die Analysen der Kapitel 2-5 werden im **sechsten Kapitel** zusammenfassend erörtert und bewertet. Die methodischen Ansätze hinsichtlich der vernetzten Fahrsimulation und die angewandten Analyseverfahren werden kritisch diskutiert und im Hinblick auf die Forschungsfragen eingeordnet. Die Arbeit schließt mit Empfehlungen für anschließende Arbeiten auf diesem Forschungsgebiet.

2 Insights into Interaction – Effects of Human-Human Interaction in Pedestrian Crossing Situations using a linked Simulator Environment

Lehsing, C., Benz, T., & Bengler, K. (2016). Insights into Interaction - Effects of Human-Human Interaction in Pedestrian Crossing Situations using a linked Simulator Environment. *IFAC-PapersOnLine*, 49(19), 138-143. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.475.

Klassische Metriken der Verkehrskonfliktforschung wie Time-To-Arrival (kurz TTA, auch Time-To-Collision, kurz TTC), maximaler Bremsdruck und Durchschnittsgeschwindigkeit standen bei dieser Studie im Mittelpunkt. Sie sollten dazu dienen, die Kritikalität in Fußgängerquerungssituationen zu bestimmen und mögliche Unterschiede im Verkehrsverhalten der Versuchsteilnehmer gegenüber programmierten, nicht interaktiven (BOT) und menschlich gesteuerten, interaktiven (TOB) Konfliktpartnern zu operationalisieren. Zudem sollte aufgezeigt werden, dass jene Metriken bedingt oder unzureichend im Stande sind, die zwischenmenschlichen Prozesse beim Lösen eines konfliktnären Zustandes abzubilden. Sie geben Auskunft über die Kritikalität einer Situation und basieren auf der Geschwindigkeit des Fahrers und dem Abstand zur potenziellen Konfliktfläche, die beide Teilnehmer aufspannen. Hinzugezogen wurde ein neueres Maß, die Deceleration-to-Safety-Time (DST), welche die notwendige Verzögerung zur Konfliktfläche unter der Bedingung eines zusätzlichen Zeitpuffers (Safety-Time) darstellt. Die DST berücksichtigt an dieser Stelle die erforderliche Verhaltensanpassung (Verzögerung), um eine Kollision beider Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Die Auswertung der Fahrdaten hat gezeigt, dass das Verhalten am Zebrastreifen, operationalisiert durch z.B. TTA und Bremsdruck, unabhängig vom Fußgängertyp war. Hier hatte der Fußgänger das Wegerecht und die Fahrer reagierten dementsprechend. Bei der ungerichteten Querung auf freier Strecke und in der Verdeckungssituationen kam es zu größeren Verhaltensunterschieden. Diese wurden hoher Wahrscheinlichkeit nach durch die jeweiligen Verhaltensweisen der Fußgänger hervorgerufen. Am deutlichsten wurden die Unterschiede in der Interaktion zwischen Fahrer und Fußgänger in der DST. Hier zeigten sich realistischere Verhaltensweisen in der Konstellation Fahrer und menschlich gesteuerter Fußgänger. Das Verhalten des programmierten Fußgängers liegt unumstritten in der Natur der Sache und war zum Zeitpunkt der Studie gängige Praxis. Die Studie konnte so aber zeigen, dass eine realistischere Interaktion in der Fahrsimulation beim Aufeinandertreffen zweier sozialer Akteure wahrscheinlicher ist, im Vergleich zur alleinigen Möglichkeit der Reaktion auf vorprogrammiertes Gehverhalten.

3 Urban Perception – A Cross-Correlation Approach to Quantify the Social Interaction in a Multiple Simulator Setting

Lehsing, C., Kracke, A., & Bengler, K. (2015). Urban Perception – A Cross-Correlation Approach to Quantify the Social Interaction in a Multiple Simulator Setting. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 1014-1021). IEEE. DOI: 10.1109/ITSC.2015.169.

Aufgrund der unzureichenden Sensitivität klassischer Verkehrssicherheitsmaße, wie Durchschnittsgeschwindigkeit, Bremsstärke, Anzahl der Kollisionen oder auch Time-To-Accident und Post-Encroachment-Time, wurden die Daten in dieser Studie mittels einer Methode aus der Zeitreihenanalyse betrachtet – der Kreuzkorrelation. Sie ist ein Vertreter der linearen Analyse von Daten und berechnet in einem ersten Schritt den Pearson'schen Korrelationskoeffizienten zweier Zeitreihen. Im zweiten Schritt wird der zeitliche Versatz (lag) beider Zeitreihen bestimmt, bei dem der Koeffizient ein Maximum erreicht. Diese Methode stellt somit sicher, auch die zeitlichen Abhängigkeiten der beiden Zeitreihen und somit der sie erzeugenden Systeme zu erfassen und zu quantifizieren. Insgesamt 30 Personen fuhren in einer vernetzten Fahrsimulation bestehend aus Fahrsimulator und Fußgängersimulator durch ein Stadtszenario. In 12 Situationen begegneten sie dabei Fußgängern an Zebrastreifen, auf freier Strecke und aus Verdeckungen heraus. Eine Hälfte der Fußgänger (BOT) war programmiert, die Straße bei einer eingestellten Distanz zum Versuchsfahrzeug zu queren. Sie verhielten sich unkooperativ und dominierten durch ihr Verhalten die Situation. Die andere Hälfte der Fußgänger (confident) wurde durch einen Assistenten am Fußgängersimulator gesteuert. Dieser hatte die Instruktion seine Querungsabsicht zu zeigen, aber auf das Fahrverhalten des Probanden im Fahrsimulator einzugehen und sicherheitsbewußt zu handeln. Die Analyse der Fahr- und Gehgeschwindigkeiten unter den verschiedenen Versuchsbedingungen zeigte, dass es jeweils eine führende und eine abhängige Zeitreihe respektive Verkehrsteilnehmer gab. Dieser Umstand wurde durch die notwendige zeitliche Verschiebung (lag, auch Time-To-React, TTR_Y) der Zeitsignale quantifiziert und zeigte, dass in Querungen mit BOTs dieser dominierte und den Fahrer in kürzerer Zeit zur Verhaltensanpassung zwang als in den Vergleichssituationen mit menschlichem Fußgänger. Das Ausmaß der Verhaltensanpassung (Pearson Korrelationskoeffizient r) war in den Situationen mit programmiertem Fußgänger höher und die Variabilität geringer als in denen, wo der Fahrer auf den menschlich gesteuerten Fußgänger traf, was auf die Dominanz des Fußgängers rückführbar ist. Die menschlichen Begegnungen dauerten im Schnitt 50% länger und die Verhaltensanpassung zwischen ihnen war im Schnitt 20% weniger perfekt, was „sozialen Reibungsverlusten“ angerechnet werden kann – beide Verkehrsteilnehmer interagierten miteinander.

4 On the Track of Social Interaction-A Non-Linear Quantification Approach in Traffic Conflict Research

Lehsing, C., Fleischer, M., & Bengler, K. (2016). On the Track of Social Interaction – A Non-Linear Quantification Approach in Traffic Conflict Research. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 2046-2051). IEEE. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795887.

Zeit schreitet normalerweise linear voran, das trifft auch für das Verkehrssystem zu. Die Analyse von Verkehrsdaten ist aufgrund dessen auch standardmäßig Zeitpunkt-basiert oder linear ausgerichtet. In der nachfolgenden Untersuchung wurde eine Methode angewendet, die im Stande ist, die nicht linearen Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Fahrern und Fußgängern zu quantifizieren – die Cross Recurrence Quantification Analysis (CRQA). Mittels der CRQA werden die Zustände (z.B. die Geschwindigkeit oder Beschleunigung) in zwei Systemen (z.B. das System Fahrer und das System Fußgänger) mit einander verglichen und über Cross Recurrence Plots (CRPs) visualisiert. Auf Basis dieser CRPs werden Komplexitätsmaße errechnet, die das Interaktionsverhalten der beiden Verkehrsteilnehmer näher beschreiben. Die Versuchsteilnehmer fuhren in einem Fahrsimulator eine vorher definierte Strecke ab und wurden durch ein Audio-Navigationssystem geleitet. An bestimmten Stellen begegneten die Fahrer entweder an einem Zebrastreifen (gerichtetes Queren), auf freier Strecke oder aus einer Verdeckung heraus (ungerichtetes Queren) zwei unterschiedlichen Fußgängervarianten. Eine war programmiert (BOT), die Straße zu queren, wenn der Fahrer eine bestimmte Distanz unterschritt. Dieser Fußgänger schaute nicht nach links oder rechts und konnte auch nicht auf das Fahrverhalten reagieren. Variante zwei der Fußgänger mit Querungsabsicht (TOB) wurde durch einen Assistenten gesteuert und war in der Lage, auf das Fahrverhalten zu reagieren – eine rudimentäre Interaktion war möglich. Die Auswertung mittels nicht linearer Methode hat hierbei gezeigt, dass die zwei unterschiedlichen Fußgängervarianten zwei typische Cross Recurrence Plots produzieren. Auch bei den Komplexitätsmaßen wurde ersichtlich, dass beispielsweise die Rate gleicher Systemzustände über die Experimentalfahrt hinweg abnahm, was ein mögliches Resultat von Lerneffekten sein kann. Interessanter jedoch waren die Ergebnisse bei den Maßen Determinismus, durchschnittliche diagonale Linienlänge und Entropie, um nur ein paar Vertreter zu nennen. Diese waren hier in hohem Maße sensitiv, Unterschiede in der Verkehrsteilnehmerkonstellation zu quantifizieren. Situationen mit programmiertem Fußgänger waren demnach hoch deterministisch (zwischen 80 und 92%) im Gegensatz zu Begegnungen zwischen zwei Menschen (44 und 61%). Ein Ergebnis, was nicht überrascht, da das Verhalten des programmierten Fußgängers keinen Spielraum hatte und weniger Varianz aufwies und per Definition einem vorherbestimmten Skript folgte.

5 Effects of Simulated Mild Vision Loss on Gaze, Driving and Interaction Behaviors in Pedestrian Crossing Situations

Lehsing, C., Ruch, F., Kölsch, F. M., Dyszak, G. N., Haag, C., Feldstein, I. T., Savage, S. W., & Bowers, A. R. (2019). Effects of Simulated Mild Vision Loss on Gaze, Driving and Interaction Behaviors in Pedestrian Crossing Situations, *Accident Analysis & Prevention*, 125, 138-151, DOI: 10.1016/j.aap.2019.01.026.

Ziel dieser Studie war die Untersuchung des Blick-, Fahr- und Interaktionsverhaltens von Fahrern mit reduzierter Sehleistung. Die Reduktion der Faktoren Sehschärfe und Kontrastsensitivität erfolgte mittels einer Filterfolie und simulierte eine Trübung der Linse (Katarakt). Die Reduktion der Faktoren war lediglich so stark, dass die Fahrer laut Gesetzgebung noch hätten fahren dürfen. Die 24 Versuchsteilnehmer durchfuhren in ca. 50 Minuten eine Teststrecke mit vier Stadtgebieten. Diese war unterbrochen von vier Autobahnabschnitten. In den urbanen Segmenten trafen sie in bestimmten Abschnitten auf Fußgänger, die die Intention zeigten, die Straße queren zu wollen. Zum einen erfolgte die Querung ungerichtet (auf freier Strecke ohne Querungshilfe) und zum anderen gerichtet (am Zebrastreifen). Der Fahrer begegnete zwei unterschiedlichen Fußgängertypen: einem programmierten Agenten (BOT), der bei einem bestimmten Abstand zum Fahrzeug des Versuchsteilnehmers die Straße querte ohne Anzeichen von Interaktion, und einem interaktiveren Fußgänger (PED). Zweiterer wurde durch einen instruierten Assistenten am Fußgängersimulator gesteuert. Dieser war mit dem Fahrsimulator vernetzt und beide Verkehrsteilnehmer konnten die auftretende Konfliktsituation aushandeln, je nach Verhalten des anderen. Zeigte der Fahrer demnach durch konstante Geschwindigkeit keine Absicht den Fußgänger passieren zu lassen, so blieb der interaktive Fußgänger am Bordstein stehen. Zur Auswertung des Verkehrsverhaltens wurden die Blickdaten beispielsweise mittels Time-to-First-Fixation und Fixation-to-Braking-Time ausgewertet. In die Analyse des fahrdynamischen Verhaltens (Kritikalität) flossen klassische Maße wie Time-To-Collision, Post-Encroachment-Time aber auch neuere, wie die Deceleration-to-Safety-Time ein. Um der zeitbasierten Interaktion Rechnung zu tragen, wurden die Geschwindigkeitssignale beider kreuzkorreliert und die maximale Korrelation sowie die dazu notwendige zeitliche Verschiebung ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass trotz signifikanter Unterschiede im Blickverhalten, die Effekte beim fahrdynamischen Verhalten mittel bis gering waren. Eine Erklärung hierfür ist die Tatsache, dass die Reduktion der visuellen Eigenschaften lediglich sehr gering war und die Fahrer trotz schlechterer Sicht ausreichend sicher reagierten. Signifikante Unterschiede gab es beim Interaktionsverhalten in Bezug auf den Fußgängertyp, und der Querungsart, was sich in den entsprechenden Maßen statistisch widerspiegelt hat.

6 Synthese und Reflexion

An dieser Stelle erfolgt eine übergreifende Verknüpfung der Forschungsfragen aus Kapitel 1.4.1, der vorgeschlagenen Lösungsansätze aus 1.4.2 sowie der Untersuchungsergebnisse aus den Kapiteln 2 - 5. Der Bogen aus anfänglicher Forschungslücke und der daraus erwachsenen Motivation zu dieser Arbeit wird über eine kritische Reflexion der neuen Erkenntnisse gespannt und das Kapitel schlussendlich durch kurze Überlegungen für weiterführende Studien in diesem Bereich geschlossen. Es wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass in den jeweiligen Publikationen gesondert und detaillierter auf die Methoden und Ergebnisse eingegangen wird und die nachfolgenden Ausführungen als übergreifende Zusammenfassung zu verstehen sind.

6.1 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Der Schwerpunkt der empirischen Erhebungen betraf die Interaktion zwischen einem PKW-Fahrer und einem weiteren Verkehrsteilnehmer und wie diese im Forschungswerkzeug Fahrsimulation umgesetzt und anschließend gemessen werden kann. Fokus der Studien lag auf der Interaktion zwischen PKW-Fahrern und Fußgängern. Eine weitere Studie betrachtete das Verhalten zwischen PKW-Fahrer und Motorradfahrer (Anhang L.1). Allen Studien gemein war die Bedingung, dass der Fahrer in ähnlichen Situationen einerseits auf einen vorprogrammierten Verkehrsteilnehmer (BOT) traf und ein anderes Mal auf einen menschlich Gesteuerten (TOB / PED). Dieser Umstand sollte einen direkten Vergleich der Verhaltensweisen und Interaktionsprozesse durch die jeweiligen Analysemethoden ermöglichen. Die Fußgängerquerungssituationen wurden nach Unfallstatistiken ausgewählt sowie unter dem Aspekt des Vorrangwechsels (ungerichtetes Queren auf freier Strecke oder aus der Verdeckung heraus vs. gerichtetes Queren am Zebrastreifen), da auch hier Verhaltensunterschiede vermutet wurden. Zudem wurde in einer Studie (Kapitel 5) die Auswirkungen einer speziellen Sehbeeinträchtigung (Katarakt), wie sie im höheren Alter gehäuft vorkommen (Haegerstrom-Portnoy et al., 1999a), untersucht, eine Beeinträchtigung der Fahrerleistung, die aufgrund des demografischen Wandels stark an Bedeutung gewinnt.

Zusätzlich zu den ausgewählten experimentellen Bedingungen wurden Analyseverfahren vorgestellt, welche im Stande sind, die linearen und nichtlinearen Verhaltensabhängigkeiten zu operationalisieren und damit einer Messbarkeit und im weiteren Verlauf einer statistischen Untersuchung zuzuführen. Zu diesen Verfahren gehören die Kreuzkorrelation und die Rekurrenzanalyse, welche sich der jeweiligen Geschwindigkeitssignale als expliziten Ausdrucks (da äußerlich sichtbar) impliziter Absichten (der Fahrer war für den Fußgänger und den Motorradfahrer nicht sichtbar) bediente. An dieser Stelle sei bemerkt, dass sicherlich auch andere Signale benutzt werden können, wie etwa die Beschleunigung/Verzögerung, der Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsgradient, eben Signale, die, äußerlich wahrgenommen, fahrdynamisch Rückschlüsse auf die Absichten des Fahrers oder seines Gegenübers zulassen.

Vergleiche mit Daten aus Realversuchen (z.B. Kotte & Pütz, 2017; Schroeder, 2008 aus Kapitel 5) werden gezogen, um Aussagen in puncto Validität zu treffen. Hier werden teilweise Unterschiede in den Mittelwerten der betrachteten Metriken (DST) deutlich, die, so die Erklärung an dieser Stelle, durchaus auf die fehlende Dynamik des verwendeten Fahrsimulators zurückzuführen sind. Den Probanden fehlte bei Bremsvorgängen schlichtweg das kinematische Feedback beim Verzögern, was im Durchschnitt für höhere Bremswerte sorgte (siehe hierzu Publikation zu Kapitel 2, Abbildungen 11, 12 und 13).

Nachfolgend werden die übergeordneten Untersuchungsergebnisse in den Bereichen Kritikalitätsmaße, lineare Analyse und nichtlineare Analyse der den Studien zugrundeliegenden Veröffentlichungen vorgestellt.

Klassische Kritikalitätsmaße

Unfallzahlen

Bei den Untersuchungen mit Fußgängerbeteiligung (Kapitel 2, 3, 4 und 5) kam es insgesamt zu 192 Beinahekollisionen. 32 (16,67%) davon in Situationen mit programmiertem Fußgänger, 160 (83,33%) bei der Konstellation menschlicher Fahrer und menschlich gesteuerter Fußgänger. In insgesamt 58 Fällen kam es zu einer Kollision zwischen Fahrer und Fußgänger, hier war das Verhältnis jedoch umgekehrt. Bei 41 (70,69%) Begegnungen mit dem programmierten Fußgänger kollidierte der Fahrer mit ihm, in nur 17 (29,31%) Fällen kam es zu einer fatalen Begegnung mit dem menschlich gesteuerten Fußgänger. Anhang B stellt die Zahlen übersichtshalber absolut dar.

Time-To-Collision

Als Indikator für die Kritikalität einer Querungssituation wurde standardmäßig das Minimum der Time-To-Collision (TTC) berechnet (van der Horst & Hogema, 1993). Situationen mit Werten kleiner als 1,5 Sekunden werden als kritisch eingestuft. Es hat sich durchgängig gezeigt, dass Situationen mit gerichteter Querung an Zebrastreifen als unkritisch eingestuft werden können (die TTCs lagen zwischen 2,3s und 3,5s). Im Kontrast dazu stehen die ungerichteten Querungen auf freier Strecke und aus der Verdeckung heraus. Das unkooperative Verhalten des programmierten Fußgängers erzeugte in den Situationen mit ungerichteter Querung kritische TTCs. Ausnahme war hier die Studie aus Kapitel 5. Hier fuhren die Fahrer generell eher vorsichtig, was sich auch in den TTC-Werten widerspiegelte, diese lagen zwischen 2,4 und 3,6 Sekunden. Anhang 0 zeigt eine Gesamtschau der Ergebnisse.

Post-Encroachment-Time

Generell ist auch hier zu sehen, dass die Situation mit Zebrastreifen als sehr sicher einzustufen ist. Die zu unterschreitende Schwelle für die Post-Encroachment-Time (PET) ist 1 Sekunde, darunter gelten Situationen als kritisch (van der Horst & Hogema, 1993). Keine der Studien kommt im Mittel in diesen Bereich. Die Rohdaten zeigen jedoch als

kritisch anzusehende Begegnungen in allen Studien, lediglich die Studie aus Kapitel 5 zeigt bei den Querungen mit ausschließlich menschlicher Beteiligung keine kritischen Werte für die PET. Eine Übersicht der Analyse ist Anhang D zu entnehmen.

Deceleration-to-Safety-Time

Die theoretisch notwendige Verzögerung, um einen vorher definierten zeitlichen Sicherheitsabstand zwischen sich und dem Fußgänger (in Bezug auf die gemeinsame Konfliktfläche) zu gewährleisten, repräsentiert die Deceleration-to-Safety-Time (DST). Der diesen Studien zugrundeliegenden zeitliche Sicherheitsabstand beträgt 3 Sekunden (Kotte & Pütz, 2017). In allen Studien wurde dem Fahrer die geringste Verzögerung am Zebrastreifen abverlangt. Das steht im klaren Gegensatz zu den Erkenntnissen von Kotte und Pütz (2017). Danach folgen naturgemäß die Situationen mit ungerichtetem Queren der Straße, wo sich der Fahrer des PKW im Recht sieht (Vorfahrt) und, wie in den Ergebnissen zu den Studien aus Kapitel 4 und 5 zu sehen ist, gerade der programmierte Fußgänger höhere Verzögerungen abverlangt, um den zeitlichen Sicherheitsabstand einzuhalten. Alle Ergebnisse sind in Anhang E dargestellt.

Eine weitere Darstellungsweise, die sich der DST bedient, ist die Berechnung der Querungswahrscheinlichkeit des Fußgängers in Bezug auf diese. Kotte und Pütz (2017) haben das für Daten aus ihrem Realversuch umgesetzt und dabei ebenso zwischen gerichtetem und ungerichtetem Verhalten unterschieden (Anhang F) Ergebnisse zu den Studien vorliegender Arbeit sind in den Anhängen G und H aufgeführt. Einerseits ist zu erkennen, dass es qualitative und quantitative Unterschiede in den Verläufen und den statistischen Maßen (Mittelwert und Standardabweichung) gibt. Zum einen kann bei Kotte und Pütz (2017) unterschieden werden zwischen gerichtetem und ungerichtetem Queren, hier werden höhere Werte erzielt bei gerichtetem Queren, also der Querung an einem Zebrastreifen beispielsweise. Ähnlich unterschieden werden können die Ergebnisse aus den Studien 2, 3 und 5, allerdings in der Art, dass hier der programmierte Fußgänger dem Fahrer höhere Verzögerungen abverlangt, um den zeitlichen Puffer von 3 Sekunden zu erreichen. Qualitativ ist das Verhalten des programmierten Fußgängers daher eher mit dem Verhalten eines realen Fußgängers beim gerichteten Queren zu vergleichen, wenn er also Vorfahrt hat. In Situationen mit menschlich gesteuertem Fußgänger fällt die Querungswahrscheinlichkeit relativ früh ab, ähnlich dem ungerichteten Queren in der Realfahrtstudie, wo das Fahrzeug Vorfahrt hat. Das Verhalten ist somit weniger dominant und als sicherheitsbewußter einzustufen.

Lineare Analyse

Kreuzkorrelationskoeffizient

Die lineare Analyse der Fahr- und Geschwindigkeitssignale mittels kreuzkorrelativer Betrachtung zeigt ein über alle empirischen Erhebungen qualitativ sehr ähnliches Bild. Der Kreuzkorrelationskoeffizient (KKK, engl. Cross Correlation Coefficient, CCC) ist Ausdruck der gegenseitigen Beeinflussung der beiden Verkehrsteilnehmer, also wie stark ihr (Geschwindigkeits-)Verhalten miteinander korreliert. Für Situationen, in den der

Fußgänger durch ein Skript gesteuert wird, ist die Korrelation im Schnitt höher als für Situationen, in denen zwei Menschen virtuell auf einander treffen. Die Rohdaten zeigen eine starke Tendenz in Richtung perfekt negativer Korrelation (Wert -1), was einem gegenläufigen Verhalten entspricht. Interaktionsbedingte Anpassungsverluste zeigen sich bei den Rohdaten der Mensch-Mensch-Konstellation innerhalb der Querungen, was in mittleren Korrelationskoeffizienten von -0,56 (gerichtetes Querens) und -0,86 (ungerichtetes Querens) kulminiert (Anhang I).

Lag

Noch viel klarer wird der Unterschied in der Interaktion zwischen Fahrer und Fußgänger bei der Betrachtung des notwendigen Zeitversatzes (lag), um den entsprechend maximalen Korrelationskoeffizient zu erreichen. Dieser Zeitversatz spiegelt die Dauer wider, die der weniger dominante Verkehrsteilnehmer benötigt, um auf das Verhalten des dominanten zu reagieren. Die Datenlage zeigt, dass man differenzieren kann zwischen positiven und negativen Zeitversätzen. Dabei erzeugen die programmierten Fußgänger in den Situationen, wo der Fahrer auf sie trifft, negative Werte, sie dominieren die Situation. Diese Dominanz rührt ganz praktisch gesehen aus ihrem vorprogrammierten Verhalten. Im Gegensatz dazu zeigen sich bei dem menschlich gesteuerten Fußgänger positive Werte für den Zeitversatz (außer für die Ergebnisse der Studie zu Kapitel 4, hier war der Fußgänger instruiert ein etwas aggressiveres Querungsverhalten zu zeigen, was auch deutlich in den Daten zu sehen ist, da es sich weniger von dem programmierten Verhalten unterscheidet als bei den anderen Untersuchungen). Ein weiteres Merkmal der programmierten Querungen ist, dass die Reaktion des Fahrers auf das tonangebende Fußgängerverhalten kürzer dauert (im Bereich von 1 Sekunde) als im Vergleich zu der interaktiven Aushandlung der Situation in den fahrerdominanten Querungen (im Bereich von 0,5 – 2 Sekunden, Anhang J).

Nichtlineare Analyse

Durch die Rekurrenzanalyse sollen nichtlineare Abhängigkeiten im Verhalten zwischen den beteiligten Verkehrsteilnehmern aufgedeckt und operationalisiert werden. In zwei Studien (Kapitel 4 und Anhang L.1) hat sich das als zielführend erwiesen. Es konnten Abweichungen im Verhalten (Kapitel 4) bzw. Unterschiede aufgrund von Variation im Assistenzgrad detektiert werden (Anhang L.1) In den Studien zu Kapitel 2, 3 und 5 gab es weniger belastbare Aussagen im Hinblick auf variierendes Interaktionsverhalten. Die Ergebnisse konnten daher in diesen Untersuchungen nicht repliziert werden, trotz ähnlicher Versuchsbedingungen (Fahrer-Fußgängerinteraktion). Eine mögliche Begründung hierfür kann für die Studien 2 und 3 die Nutzung einer reduzierten Version des Fußgängersimulators (3 Bildschirme und Steuerung des Fußgängers durch den Konfigurator mittels Tastatur, siehe Abbildung 2 zu Publikation aus Kapitel 2) darstellen und ein damit einhergehendes differenzierendes Fußgängerinteraktionsverhalten in den Querungsszenarien im Vergleich zum Verhalten des Fußgängers aus Kapitel 4. Dieser wurde über ein Head-Mounted Display und ein Bewegungserfassungssystem an die virtuelle Welt angeschlossen und traf dort in Echtzeit auf den Fahrer im Fahrsimulator

(siehe Abbildung 1 und 2 aus der Publikation zu Kapitel 4). Eine systematische Verwendung, um interaktives Verkehrsverhalten zu operationalisieren, ist daher vorerst ausgeschlossen.

6.2 Diskussion der Untersuchungsmethode

Die vorliegende Arbeit nutzt das Paradigma der vernetzten Fahrsimulation als Erweiterung des klassischen Ansatzes. Ziel war es, die natürlich auftretende Interaktion zwischen den Verkehrsteilnehmern zu realisieren und zu fördern, um die Untersuchungsergebnisse dieser Methode ökologisch valider und damit belastbarer, generalisierbarer zu machen. Für die Studien wurden verschiedene Versuchsaufbauten genutzt, angefangen von einem Fußgängersimulator basierend auf drei Bildschirmen, einem Rechnernetzwerk und einer Tastatur zur Steuerung des menschlichen Fußgängers, über einen Fußgängersimulator mit Bewegungserfassungssystem inklusive Head-Mounted-Display zur Steuerung desselben Fußgängers in der virtuellen Welt (siehe Publikation aus Anhang L.2). Der zu steuernde Fußgänger-Avatar in der Simulation war in Bezug auf sein äußeres Erscheinungsbild konstant, die Bewegungen (Laufen, Körperdrehung, Kopfdrehung), die er ausführen konnte, waren aufgrund der unterschiedlichen Ansteuerungsvarianten (Tastatur oder Bewegungserfassungssystem) in den verschiedenen Ausbaustufen des Fußgängersimulators allerdings verschieden. Die Tastatursteuerung in der Studie zu Kapitel 2 und 3 ließ nur eine rudimentäre Körperdrehung und ein Geradeausgehen zu, die Steuerung in der Studie zum Kapitel 5 ein kontrollierteres Geradeausgehen und eine definierte Ansteuerung der Kopf- und Oberkörperdrehungsanimation. Der Aufbau aus Kapitel 4, das Bewegungserfassungssystem, erlaubte im Gegensatz zu den anderen eine weitaus natürlichere Bewegungsvielfalt. Allen gemein ist jedoch die etwas biomechanisch anmutende Bewegung des Avatars beim Queren der Straße. Da sich die anderen, nicht extern menschlich gesteuerten Fußgänger, jedoch ähnlich, allerdings nicht interaktiv, bewegten, fiel das weniger auf. Im Sinne eines zu vermeidenden visuellen Stilbruchs zwischen programmiertem und menschlich gesteuertem Fußgänger wurden die beschriebenen Lösungen zusätzlich befürwortet. Da immer nur ein bestimmter Avatar durch den menschlichen Fußgänger steuerbar war und dieser immer gleich aussah (äußere Erscheinung und Kleidung), mussten neben den Situationen, die in die Auswertung einfließen, auch ablenkende Situationen geschaffen werden. Hier stand derselbe Fußgänger am Straßenrand, wurde jedoch nicht angesteuert, der Fahrer musste nicht mit ihm interagieren. In den Studien der Kapitel 2, 3 und 4 wurden die Querungssituationen (insgesamt zwölf pro Testfahrt) nicht randomisiert, dies wurde in der Studie zu Kapitel 5 aufgrund der hohen Anzahl an Situationen (32 relevante, 16 ablenkende) nachgeholt. Weiterhin wurde das Verhalten des menschlichen gesteuerten Fußgängers teilstandardisiert, um die interaktiven Situationen herzustellen. Dies bedeutet, dass der Assistent, der den Fußgänger steuert, den ersten Schritt in Richtung Straße bei einem bestimmten Abstand zum Fahrer vollzog, danach kam eine Zuwendung der Blickrichtung hin zum Fahrer, je nach Fahrverhalten (verzögert oder nicht verzögert) querte der Fußgänger dann, aufmerksam und sicherheitsbewußt (schaden- und kollisionsvermeidend), die Straße. Dieses standardisierte Verfahren war deshalb

notwendig, damit die künstlich konstruierten Querungssituationen an sich funktionierten und die beiden Verkehrsteilnehmer in den zeitlichen und räumlichen Rahmen, der notwendig zur Interaktion war, kamen.

6.3 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Klassische Kritikalitätsmaße

Die Unfallzahlen zeigen, dass das programmierte Verhalten des Fußgängers zu einer höheren Anzahl an Kollisionen führte und als eher unkooperativ respektive nicht interaktiv einzustufen ist. Es ist vergleichbar mit einem unaufmerksamen Fußgänger, der die Straße quert und nicht auf den Umgebungsverkehr achtet. Dieses kritische und nicht auf Sicherheit bedachte Verhalten ist aufgrund der Eigenschaften eines Fußgängers als der Verletzlichste unter ihnen eher unwahrscheinlich und wird in der Verkehrserziehung bereits anders vermittelt (Baader & Binder, 2010). Trotzdem verursacht Fehlverhalten auf Seiten des Fußgängers jeden zehnten tödlichen Verkehrsunfall und die Hälfte davon aufgrund Nichtbeachtens der anderen Verkehrsteilnehmer, da beispielsweise knapp 8% beim Überqueren der Straße auf dem Smartphone Nachrichten eingeben (Rosenfeld, 2016).

Die hohe Anzahl von Beinaheunfällen mit menschlich gesteuertem Fußgänger rührt mehrheitlich daher, wie eine Kollision/ein Beinaheunfall definiert wird. Anhang B zeigt schematisch die Bereiche rund um das Fahrzeug, welche in die Berechnung für Beinahekollisionen und Kollisionen in den Untersuchungen berücksichtigt wurden. Befand sich ein Fußgänger in diesen Bereichen, zählte es in die jeweilige Kategorie. Dabei ist zu sehen, dass unter Verwendung des Radius (Entfernung: Fahrzeugschwerpunkt-Stoßstange vs. Fahrzeugschwerpunkt-Fahrzeugseite) hier ein vereinfachter Ansatz gewählt wurde, um die entsprechende Kollisionskategorie zu berechnen. Dieser sollte in zukünftigen Studien optimiert werden und sich an den rechteckigen Abmaßen der Karosserie orientieren. Es wird vermutet, dass bei der optimierten Berechnung die hohe Anzahl an Beinaheunfällen, die lediglich Vorbeifahrten des PKW am Fußgänger, welcher sich noch auf dem Bürgersteig befand, stark reduziert wird.

Die Kritikalitätsmaße TTC und PET zeigen sich sensitiv, Unterschiede in den jeweiligen Versuchsbedingungen (Fußgängertyp, Querungsart, Sehleistung) im Hinblick auf die Kritikalität der Situation zu erfassen. Gesetzeskonform ist die TTC und PET am Zebrastreifen am unkritischsten bei allen Studien, da sich die Fahrer hier aufgrund der Vorfahrtsregelung und Gesetzeslage (Bußgeldkatalog: Verband für bürgernahe Verkehrspolitik e.V., 2018a) vorsichtiger annähern.

Die DST berücksichtigt erstmals eine gewisse Verhaltensanpassung (Geschwindigkeitsreduktion durch Verzögerung) zwischen den Verkehrsteilnehmern, um eine vorher definierte zeitliche Lücke (Sicherheitsabstand) in Bezug auf die theoretisch gemeinsam genutzte Straßenfläche (Konfliktzone) zu realisieren. Die reinen Durchschnittswerte der DST variieren beim programmierten Fußgänger weniger als beim menschlichen, was wiederum dem vordefinierten Verhalten und dem daraus

resultierenden engen Reaktionsspielraum für den Fahrer geschuldet ist. Interessanter ist in diesem Fall die Betrachtung, ob ein Fußgänger in Abhängigkeit der DST in der jeweiligen Situation queren würde (Anhang F - H). Hier sind Ähnlichkeiten zwischen den Realdaten (Kotte & Pütz, 2017) und den Untersuchungen derart zu erkennen, dass der programmierte Fußgänger nahezu zu 100% quert, unabhängig von der Geschwindigkeit und der daraus resultierenden Verzögerung des Fahrers. Erst ab Verzögerungen von 7 – 8 m/s² reduziert sich die Querungswahrscheinlichkeit merklich, ein qualitativ ähnliches Verhalten wie beim gerichteten Queren in der Realität. Beim menschlich gesteuerten interaktiven Fußgänger, welcher auf das Fahrverhalten reagieren kann, zeigt sich eine andere Kurve. Hier reduziert sich die Querungswahrscheinlichkeit viel früher (3 – 4 m/s²), vergleichbar mit dem Verhalten realer Fußgänger beim ungerichteten Queren, wo diese aufgrund der Vorfahrtsregelung vorsichtiger sein müssen und stärker auf das Verhalten und Verzögerungsempfinden (Verzögerungen über 3 m/s² werden als unkomfortabel empfunden vgl. Publikation zu Kapitel 5 Abbildung 11 (Schroeder, 2008)) der herannahenden Fahrer achten müssen.

Die Mehrzahl der Studienergebnisse weist darauf hin, dass der programmierte Fußgänger (BOT) eher bei Fragestellungen einzusetzen ist, wo ein gerichtetes Queren (z.B. Zebrastreifen) Bestandteil der Szenarien ist und der Fußgänger das Wegerecht hat. Um diese Querungen der Realität anzunähern, wird jedoch empfohlen, das Orientierungsverhalten, insbesondere Kopfdrehung, Oberkörperdrehung, Blickkontakt mit Fahrer, als Komponenten des Annäherungs- und Querungsverhalten zu berücksichtigen.

Im Gegensatz dazu, wenn es in den interessierenden Szenarien auf die zwischenmenschliche Abstimmung zwischen Fußgänger und Fahrer ankommt und teilweise informelle Regeln und Handlungen dominieren, z.B. bei ungerichteten Querungen zwischen Knotenpunkten ohne Querungshilfe (Zebrastreifen, Fußgängerampel) skizzierte die Mehrheit der Untersuchungsergebnisse ein realeres Verhalten beim Einsatz des menschlich gesteuerten Fußgängers (PED). Dieser zeigte ein sicherheitsbewusstes (Queren, nur wenn es die Situation und das Verhalten des Fahrers dies erlaubt) und interaktionsfreudigeres (Kopfdrehung / Blickkontakt) Verhalten gegenüber dem Fahrer, was die Studienergebnisse und der Vergleich mit Realdaten (z.B. (Färber, 2015; Kotte & Pütz, 2017; Schroeder, 2008) widerspiegeln.

Lineare Analyse

Die Teilnahme am Straßenverkehr ist eine hochinteraktive Tätigkeit. Bricht die Interaktion zwischen den Verkehrsteilnehmern zusammen, kommt es nicht selten zu kritischen Situationen – dem Verkehrskonflikt. Zwei oder mehr Konfliktparteien stehen sich ziel- und ressourcenbedingt unvereinbar gegenüber, wenn nicht eine Seite ihr Verhalten anpasst. Diese Anpassung auf das die Situation dominierende Verhalten sollte mittels der linearen Analyse operationalisiert werden. Eine Vorstufe, um es daraufhin quantifizieren und vergleichen zu können. Die kreuzkorrelative Analyse erlaubt es nun, auf Basis der Geschwindigkeitssignale der Konfliktpartner deren Interaktionsverhalten

zu messen. Die Geschwindigkeitssignale stellen im Rahmen dieser Arbeit ein informationstragendes Signal dar (vgl. Kapitel 1.2: äußerlich sichtbar, wahrnehmbar, gemeinsames Verständigungssystem, verhaltensbeeinflussende Wirkung), welches durch die Methode genutzt werden kann.

Der Kreuzkorrelationskoeffizient ist über alle Untersuchungen hinweg für die Begegnungssituationen mit programmierten Fußgängern (BOT) höher, da der (aufmerksame, unbeeinträchtigte) Fahrer keine andere Wahl hat, als auf das dominante Querungsverhalten (hohe Querungswahrscheinlichkeit des BOTs, trotz hoher DST-Werte, siehe Abschnitt zu Kritikalitätsmaßen) immer mit Verzögern zu reagieren, will er eine Kollision vermeiden. Die Begegnungen sind also eher als reaktiv und nicht als interaktiv einzustufen, da hier kein gegenseitiges Reiz-Reaktionsschema (siehe Kapitel 1.2) besteht (Fritz et al., 1975), sondern lediglich ein unilaterales.

Aufgrund fehlender Verhaltensabstimmung findet die Reaktion des Fahrers relativ zu den Situationen mit menschlichem Fußgänger schneller statt. Der Zeitversatz ist geringer, der Fahrer muss in kürzer Zeit reagieren, um eine Kollision zu vermeiden (höhere durchschnittliche DST-Werte). Im Kontrast dazu wurden bei den Begegnungen zwischen menschlichem Fahrer und menschlichem Fußgänger zwei Veränderungen beobachtet: ein geringerer Korrelationskoeffizient und ein höherer Zeitversatz. Ersterer kann unter Umständen auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: (1) zwischenmenschliche Interaktion muss, um sicher abzulaufen, nicht perfekt (KKK nähert sich -1 oder +1 an), sondern nur ausreichend gut sein bzw. führt die Interaktion zwischen zwei Individuen zu korrelativen Reibungsverlusten, welche sich in einem geringeren Kreuzkorrelationskoeffizienten widerspiegeln, und (2) beide Verkehrspartner mussten das Verhalten des anderen erst wahrnehmen und interpretieren, um dann darauf adäquat reagieren zu können (Juhlin, 2001). Kommunikative Missverständnisse waren hier nicht ausgeschlossen und führten unter Umständen zu längeren Interaktions- oder Abstimmungsphasen bzw. zu Verkehrskonflikten. Die Heterogenität im Verhalten ist sehr deutlich in den Kreuzkorrelationsfunktionen der jeweiligen Begegnungen zu sehen (beispielhaft in Anhang K dargestellt).

Zusätzlich stellt die Identifikation der dominanten Zeitreihe, also des Verkehrsteilnehmers, nach dem sich der andere richtet, und sein Verhalten anpasst, durch die kreuzkorrelative Betrachtung der beiden Geschwindigkeitssignale eine wertvolle Erkenntnis dar. Eine Realstudie von Katz, Zaidel, and Elgrishi (1975) hat hier unterstützend gezeigt, dass sobald ein Fußgänger die Straße betritt, das Fahrerverhalten jenes ist, welches die Interaktion zwischen beiden Verkehrsteilnehmern dominiert. Ein Verhalten, was mehrheitlich bei den Querungen mit menschliche gesteuertem Fußgänger beobachtet werden konnte und durch einen positiven Zeitversatz (lag) quantifiziert wurde (siehe dazu auch Publikation zu Kapitel 5).

Nichtlineare Analyse

Zur Aufdeckung nichtlinearer Verhaltensanteile wurde die CRQA, basierend auf Kreuzrekurrenzplots (engl. Cross Recurrence Plots, kurz CRPs), bei der Analyse der Geschwindigkeitssignale eingesetzt. Die Ergebnisse zeigten über die Studien hinweg unterschiedliche Strukturen in den CRPs und damit variierende Tendenzen in den Komplexitätsmaßen. Eine einheitliche Aussage kann an dieser Stelle nicht getroffen werden und von der Nutzung dieser Methode im Rahmen ähnlicher Untersuchungen wird vorerst abgeraten. Gründe für die Streuung der Ergebnisse werden einerseits in der zugrundeliegenden Signallänge der betrachteten Querungssituationen vermutet. Die CRQA nutzt standardmäßig eher lange Zeitreihen als Analysebasis. Die Zeitreihen in den Querungssituationen waren allerdings eher im Sekundenbereich, ein Umstand, den es zu berücksichtigen gilt. Zum anderen wurden in den unterschiedlichen Untersuchungen (Kapitel 2, 3, 4 und 5) unterschiedliche Versuchseinrichtungen genutzt. Dies ist den variierenden Ausbaustufen des Fußgängersimulators zuzuschreiben sowie dem Umstand, dass die Daten zur Untersuchung in Kapitel 5 in einem Partnerlabor im Ausland erhoben wurden.

Trotzdem sei die Studie aus Anhang L.1 (Walz, Lehsing, Bengler, Will, & Sich, 2017) nochmals erwähnt. In dieser war die nichtlineare Analyse sensitiv genug, Unterschiede im Interaktionsverhalten aufgrund des Ausstattungsgrades mit dem Kreuzungsassistenten zu erfassen. Es liegt also durchaus Potenzial in dieser Methode, die Anwendung dieser sollte aber von Fall zu Fall genauestens geprüft werden.

6.4 Beantwortung der Forschungsfragen

Forschungsfrage 1, die danach fragte, ob die vernetzte Fahrsimulation dazu beiträgt, die ökologische Validität von Fahrsimulationen zu stärken, kann unter Zuhilfenahme der Ergebnisse somit für den Großteil der Szenarien positiv beantwortet werden. Das reale zwischenmenschliche Abstimmungsverhalten wird durch die Vernetzung begünstigt, da hier, wie in der Realität, zwei Menschen aufeinandertreffen und der menschliche Fahrer nicht mit den Unzulänglichkeiten eines modellierten Agenten in der Simulation konfrontiert wird.

Forschungsfrage 2 thematisierte Analysemethoden und Metriken, welche im Stande sind soziale Interaktion erfassen können. Hier haben sich insbesondere das Kritikalitätsmaß Deceleration-to-Safety-Time sowie die lineare Analyse durch die Kreuzkorrelation als sehr vielversprechend erwiesen. Als weniger konsistent präsentierte sich der nichtlineare Ansatz mittels Cross Recurrence Quantification Analysis.

Forschungsfrage 3 behandelt den Einfluss einer Reduzierung des Visus und der Kontrastsensitivität, dem fahrrelevantesten unter den menschlichen Sinnen, auf das Blick-, Fahr- und Interaktionsverhalten. Da in der dazugehörigen Studie zu Kapitel 5 an der gesetzlichen Grenze der visuellen Wahrnehmungsschwelle gearbeitet wurde und Fahrer mit diesem Sehvermögen weiterhin ihren Führerschein behalten dürfen, ist es nicht verwunderlich, dass lediglich das Blickverhalten, nicht jedoch das Fahr- und

Interaktionsverhalten durch die experimentelle Reduktion der individuellen Sehleistung wesentlich beeinträchtigt wurde.

6.5 Allgemeine Empfehlungen für anschließende Studien

Der Betrieb eines Fahrsimulators benötigt neben der grundlegenden Investition in die entsprechenden infrastrukturellen auch die passenden personellen Ressourcen. Diese Investitionen erhöhen sich unter Umständen signifikant, wenn mehrere Simulatoren zu einem Netzwerk verschaltet werden sollen, um Verkehrsszenarien valider zu untersuchen. Es gehört daher eingangs immer geprüft, ob die zugrundeliegenden Forschungsfragen und die daraus resultierenden Untersuchungsdesigns tatsächlich die genannten Mehrinvestitionen rechtfertigen.

Handelt es sich um Untersuchungen, die strukturbedingt weniger Interaktion zwischen den beteiligten Verkehrsteilnehmern erfordern, weil beispielsweise die Gebrauchstauglichkeit eines Infotainmentsystems im Fokus steht, so ist es sicherlich ausreichend, den Umgebungsverkehr durch die aktuellen Verhaltensmodelle (siehe Kapitel 1.3.1) zu steuern. Ebenso sind Untersuchungen, die Verkehrssituationen betrachten, die durch explizite Regelungen und Gesetze stark vordefiniert und wo Regelverstöße unter Umständen mit empfindlichen Strafen verbunden sind, mit dem klassischen Ansatz des Einpersonenversuches im Fahrsimulator gut bedient.

Untersuchungen, deren elementarer Bestandteil die gegenseitige Verhaltensabstimmung zwischen Verkehrsteilnehmern (z.B. gleichrangige Kreuzungen, Queren ohne Querungshilfe) ist, wo informelle Handlungen und non-verbale Kommunikation zum Interaktionsrepertoire gehören und wo die Begrenztheit vordefinierten Verhaltens durch in Programmzeilen definierte Skripte den Handlungsspielraum und dessen zeitliche Dynamik unnatürlich einschränken, profitieren mit hoher Sicherheit vom Ansatz der vernetzten Simulation und den hier beschriebenen Analyseverfahren.

Anhang

A Safety Pyramid (nach Hydén, 1987)

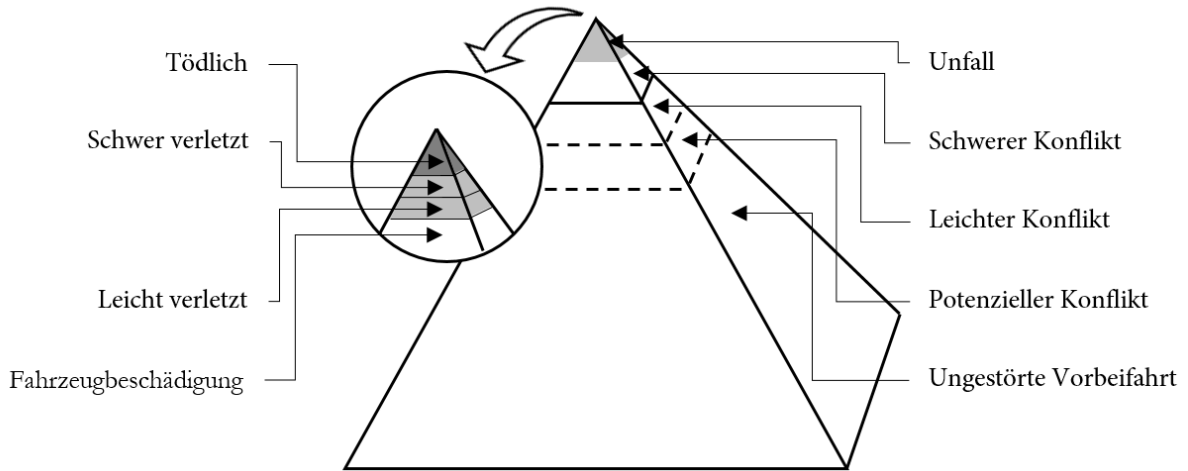


Abbildung A: Qualitative Darstellung zum Anteil von Verkehrskonflikten

B Übersicht zu den Beinahekollisionen und Kollisionen

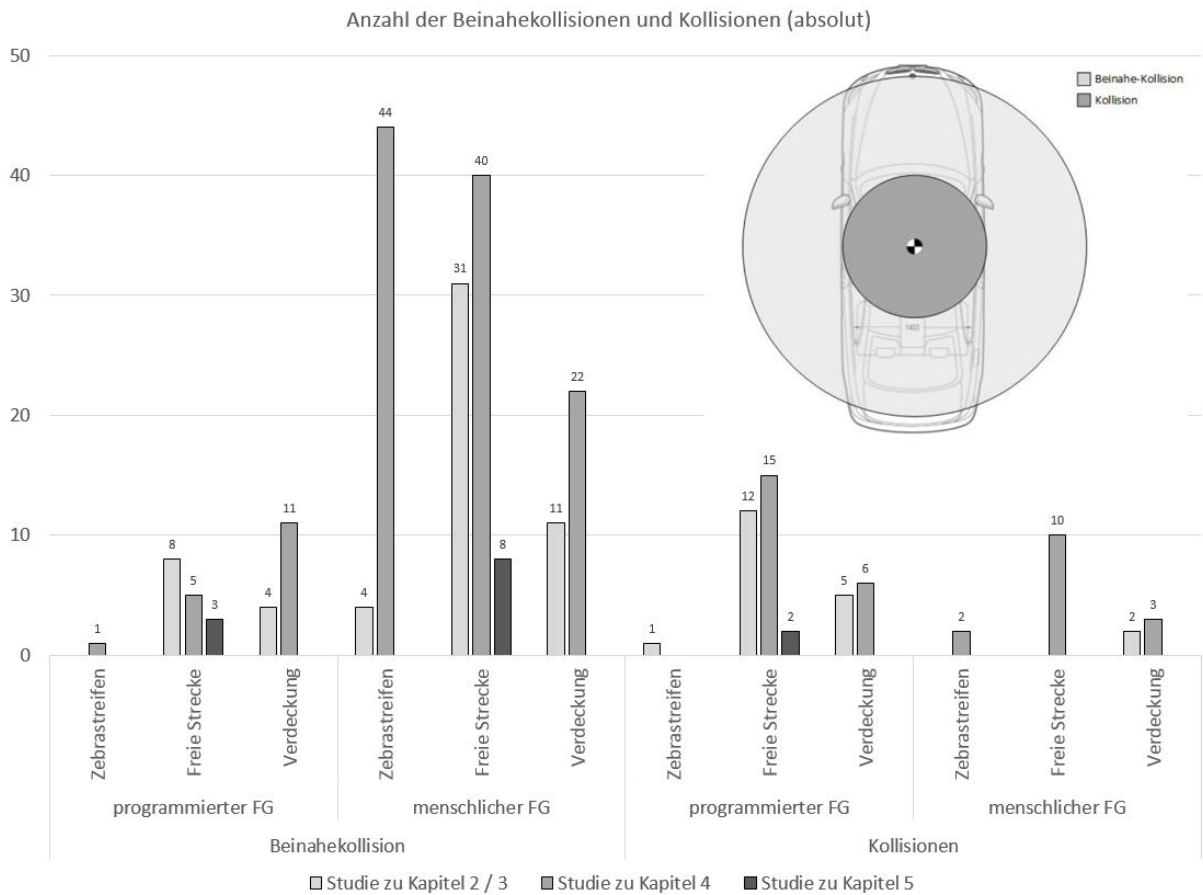


Abbildung B: Übersicht zu den Beinaheunfällen und Unfällen der Studien

C Übersicht zur Time-To-Collision

Die Diagramme (pirate plots, Phillips, 2018) enthalten die Datengrundlage (Punkte), die Datenverteilung (Dichtekontur), den Mittelwert (schwarzer Balken) und die Standardabweichung (Rechtecke)

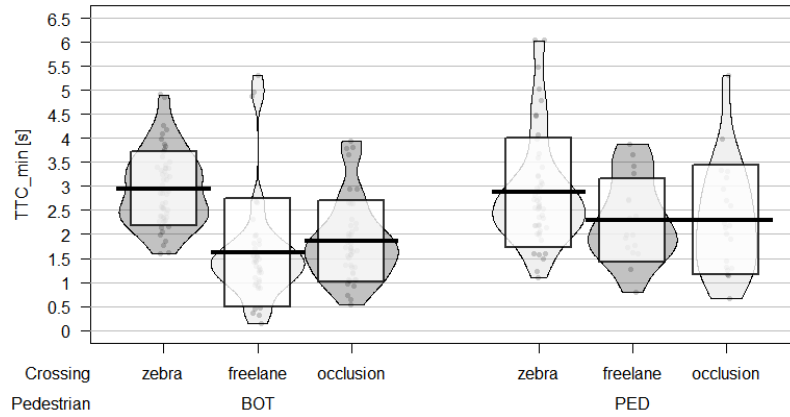


Abbildung C-1: minimale TTC-Werte zur Studie aus Kapitel 2 und 3

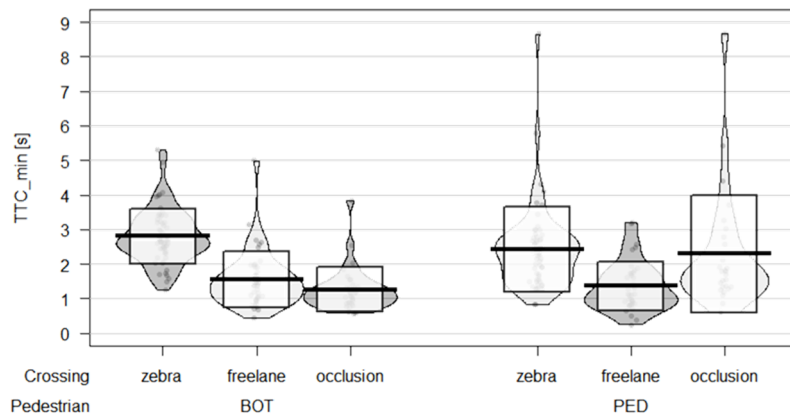


Abbildung C-2: minimale TTC-Werte zur Studie aus Kapitel 4

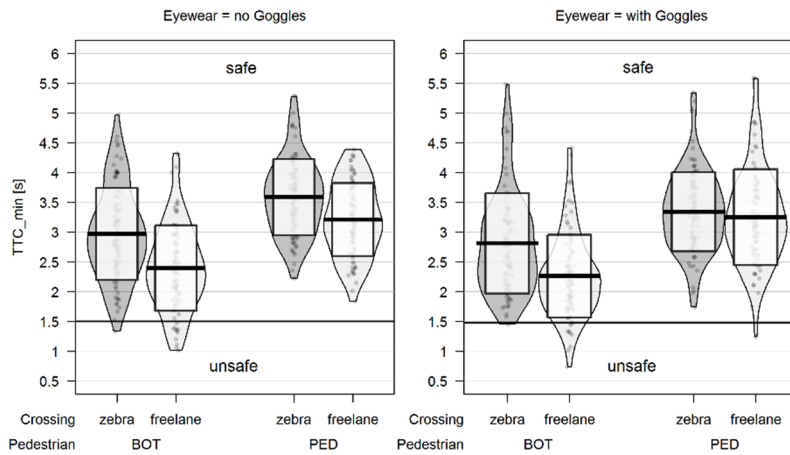


Abbildung C-3: minimale TTC-Werte zur Studie aus Kapitel 5

D Übersicht zur Post-Encroachment-Time

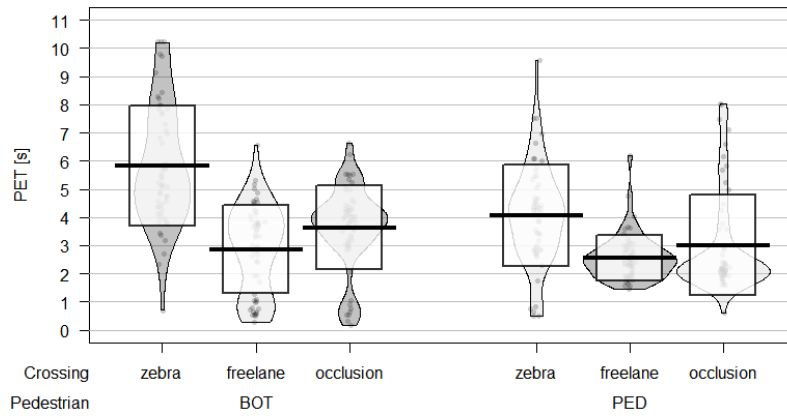


Abbildung D-1: PET-Werte zur Studie aus Kapitel 2 und 3

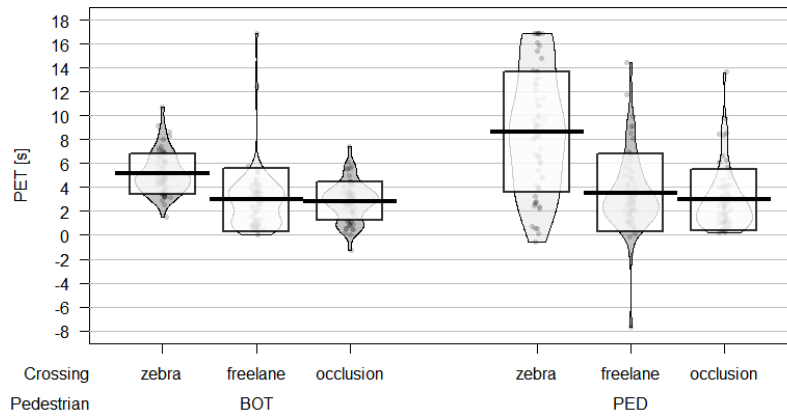


Abbildung D-2: PET-Werte zur Studie aus Kapitel 4

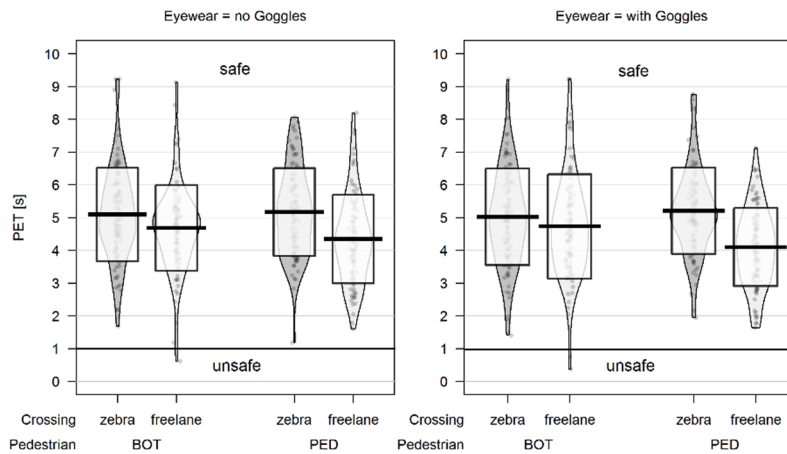


Abbildung D-3: PET-Werte zur Studie aus Kapitel 5

E Übersicht zur Deceleration-to-Safety-Time

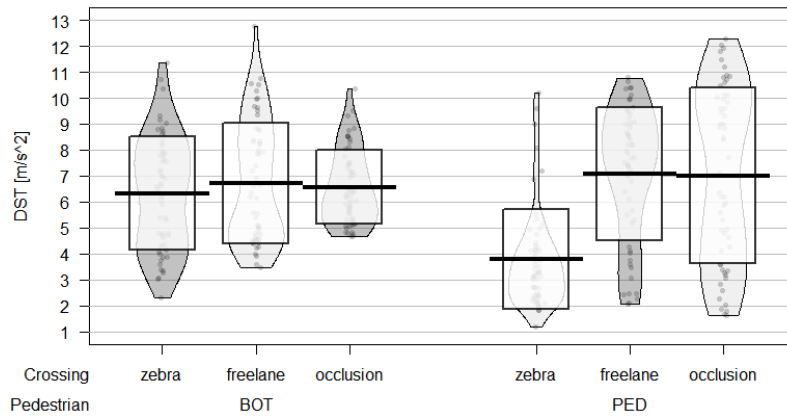


Abbildung E-1: DST-Werte für die Studien aus Kapitel 2 und 3

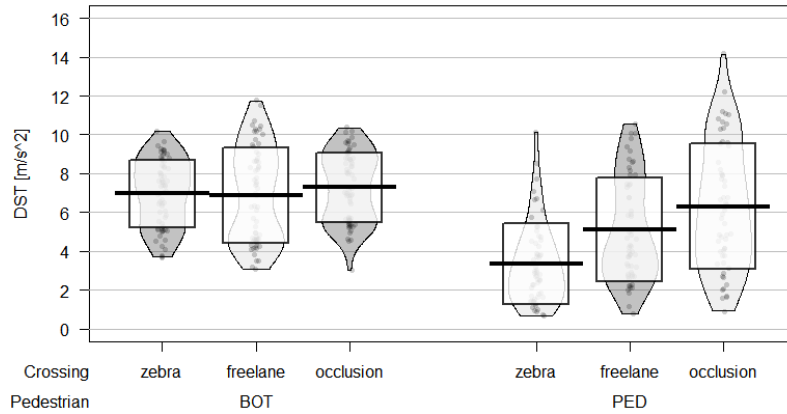


Abbildung E-2: DST-Werte für die Studie aus Kapitel 4

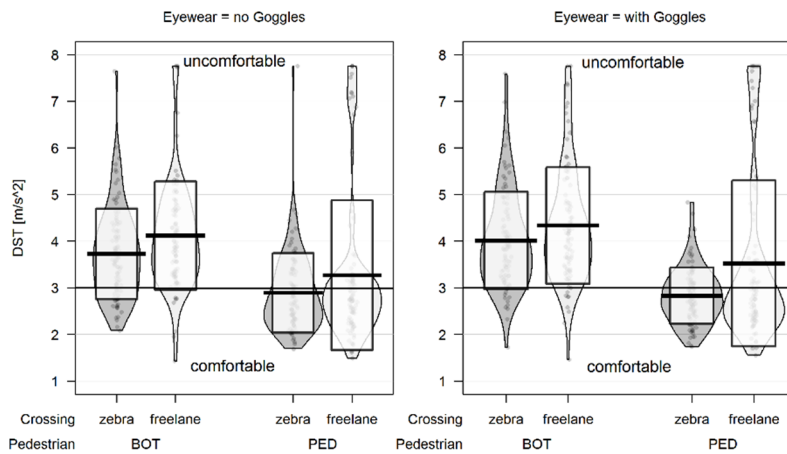


Abbildung E-3: DST-Werte für die Studie aus Kapitel 5

F Querungswahrscheinlichkeit und Deceleration-to-Safety-Time (Kotte & Pütz,

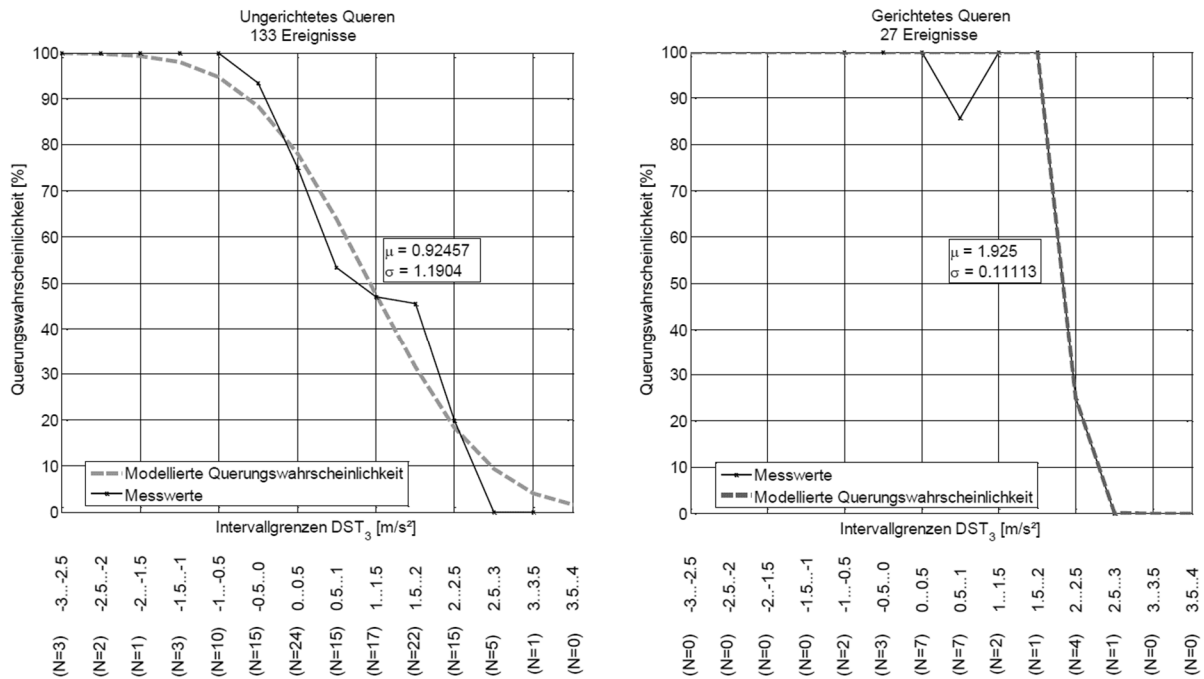


Abbildung F: Querungswahrscheinlichkeit über DST aus der Realfahrtstudie (Kotte & Pütz, 2017)

2017)

G Querungswahrscheinlichkeit und Deceleration-to-Safety-Time zur Studie aus Kapitel 2 und 3

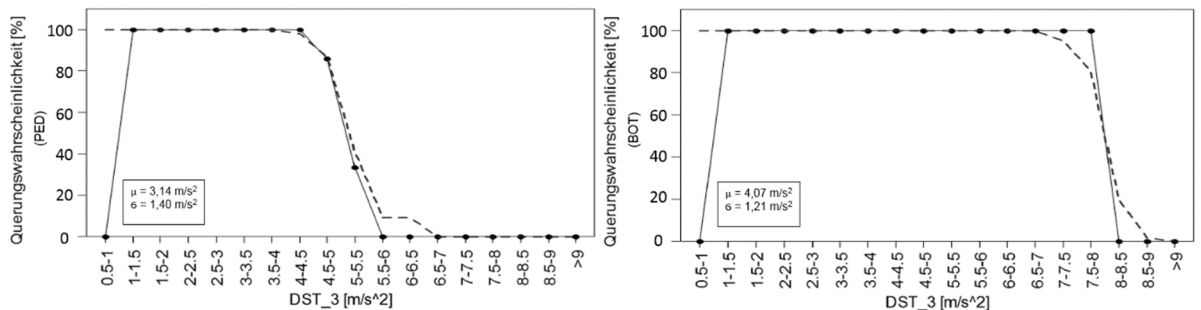


Abbildung G: Querungswahrscheinlichkeit über DST für die Studie aus Kapitel 2 und 3

H Querungswahrscheinlichkeit und Deceleration-to-Safety-Time zur Studie aus Kapitel 5

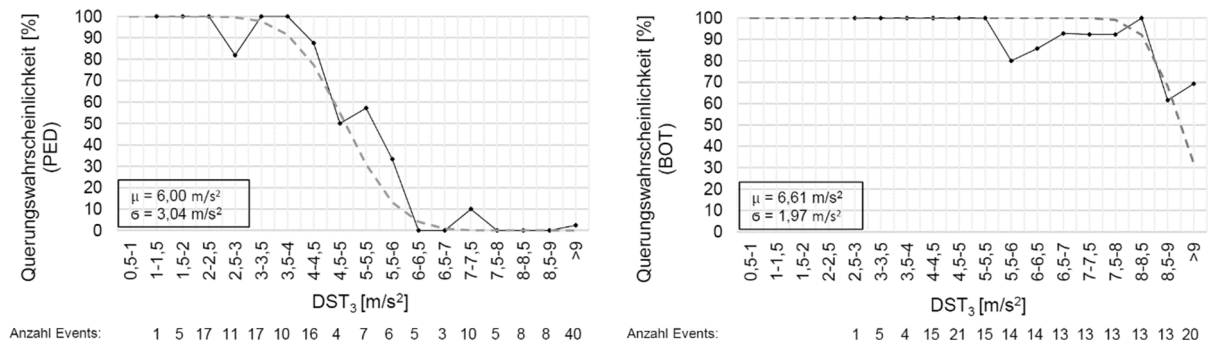


Abbildung H: Querungswahrscheinlichkeit über DST zur Studie aus Kapitel 5

I Lineare Analyse – Die Kreuzkorrelationskoeffizienten

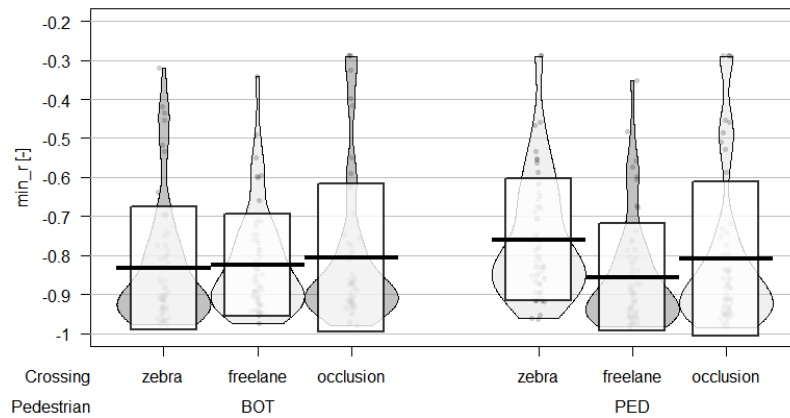


Abbildung I-1: Kreuzkorrelationskoeffizient r zur Studie aus Kapitel 2 und 3

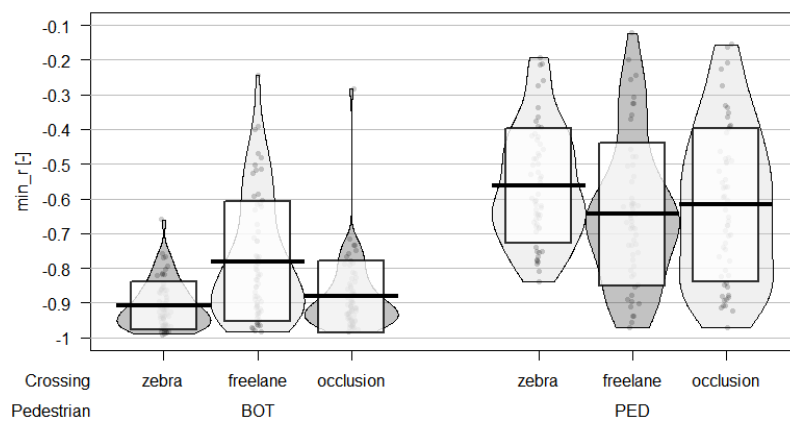


Abbildung I-2: Kreuzkorrelationskoeffizient r zur Studie aus Kapitel 4

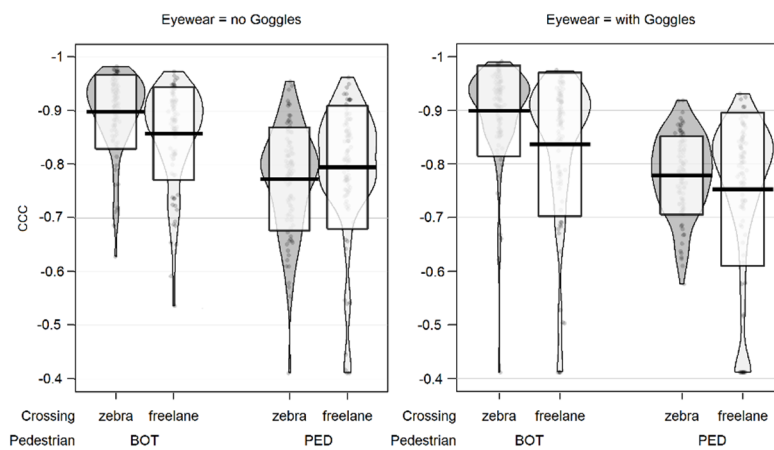


Abbildung I-3: Kreuzkorrelationskoeffizient r zur Studie aus Kapitel 5

J Lineare Analyse – Der Zeitversatz

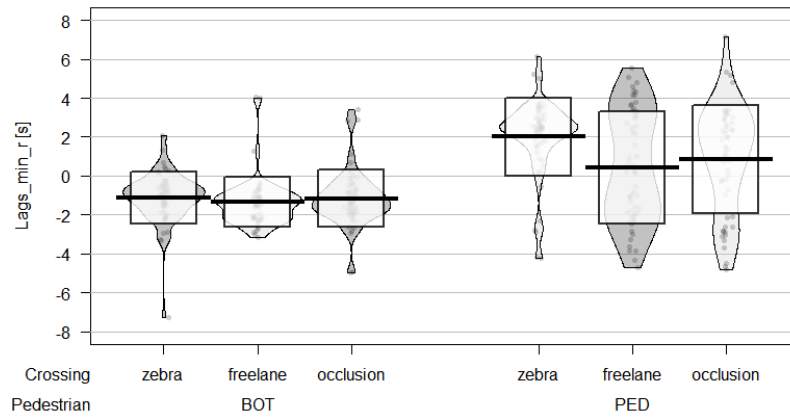


Abbildung J-1: Werte des Zeitversatzes zur Studie aus Kapitel 2 und 3

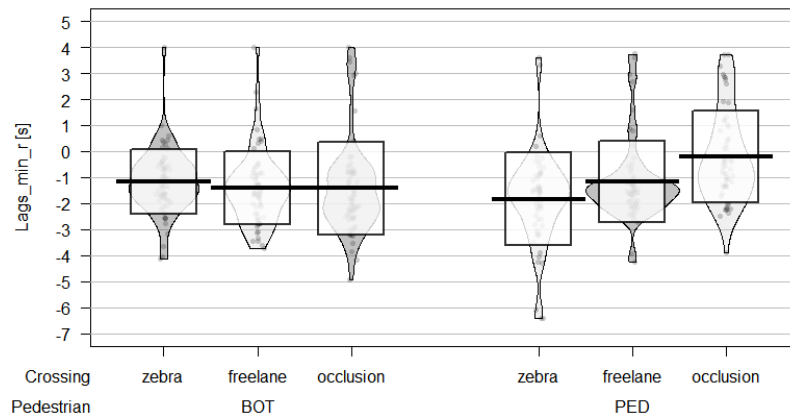


Abbildung J-2: Werte zum Zeitversatz zur Studie aus Kapitel 4

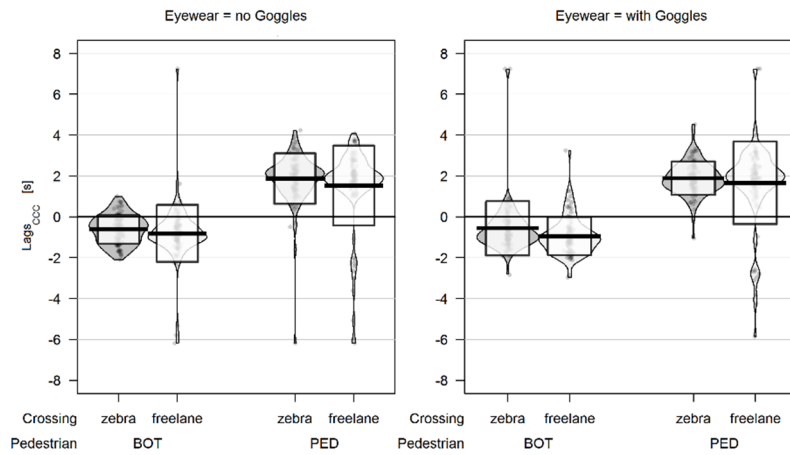


Abbildung J-3: Werte zum Zeitversatz zur Studie aus Kapitel 5

K Kreuzkorrelationsfunktion – Beispiel

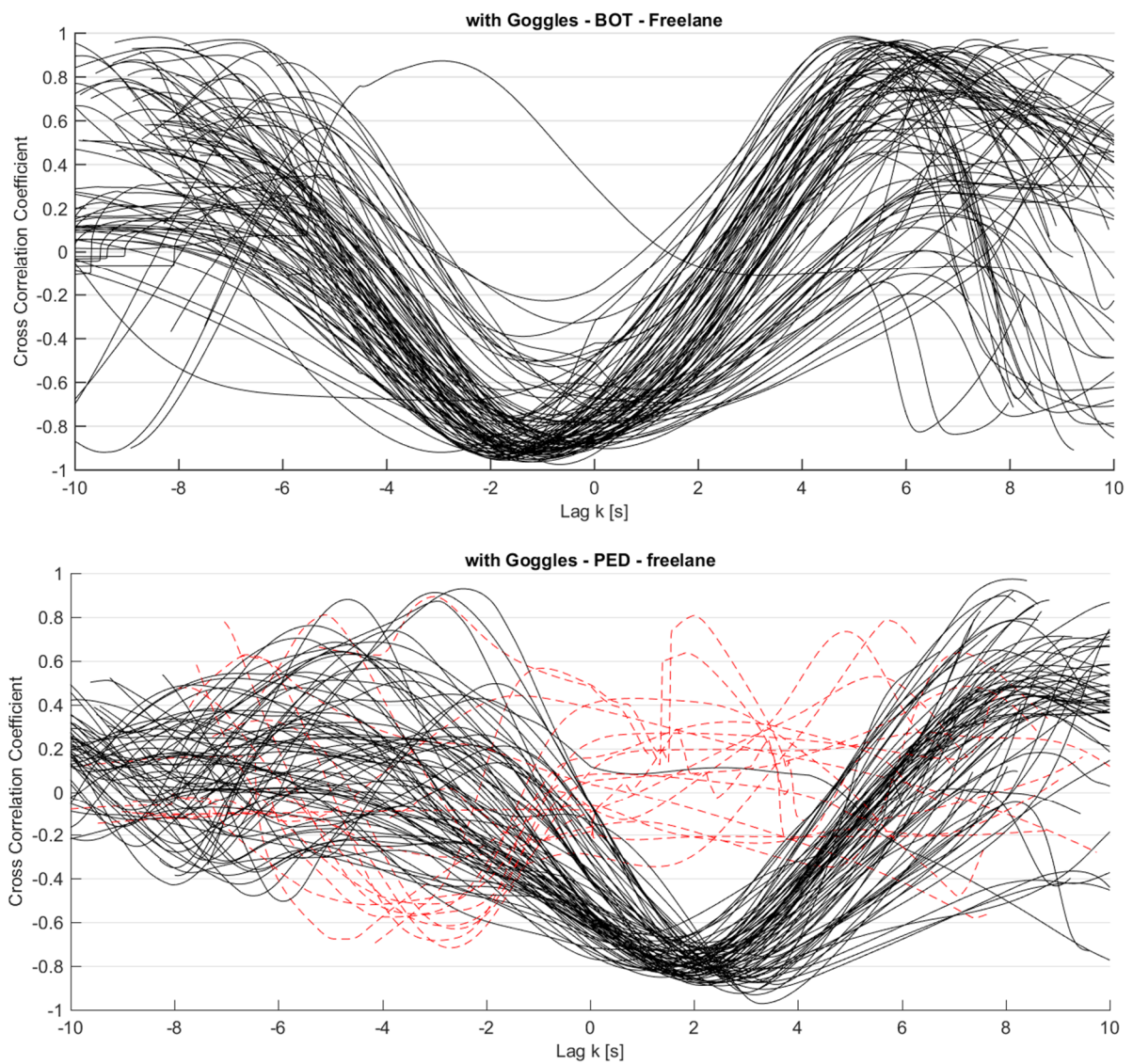


Abbildung K: Kreuzkorrelationsfunktion zur Studie aus Kapitel 5 (PED - menschlich gesteuerter Fußgänger, BOT - programmierter Fußgänger, Lag k – Zeitversatz; rote (gestrichelte) Linien repräsentieren Begegnungssituationen in denen der Fahrer den Fußgänger nicht passieren ließ)

L Unterstützende Studien

L.1 Impacts of an Intersection Assistance System: Social Interaction between Drivers and Motorcyclists

Walz, M., Lehsing, C.², Bengler, K., Will, S., & Sich, M. (2017). Impacts of an Intersection Assistance System: Social Interaction between Drivers and Motorcyclists. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering* (pp. 279-286). ACM. DOI: 10.1145/3057039.3057077.

Um die Anwendbarkeit der Analyseverfahren zur Quantifizierung sozialer Interaktion auch im Bereich motorisierter Zweiräder zu überprüfen, wurden Daten aus einer weiteren Vernetzungsstudie³ linear und nichtlinear untersucht. So wurden zur Untersuchung der Effekte eines Kreuzungsassistenten zur Warnung vor potenziellen Kollisionen ein Fahr Simulator mit einem Motorradsimulator vernetzt. 62 Probanden fuhren zeitlich synchronisiert auf Kreuzungen zu und waren, je nach Versuchsbedingung, mit einem Assistenten, welcher vor dem herannahenden Konfliktpartner über ein visuelles Icon warnt, ausgestattet oder nicht. Bei 50 (Auto) respektive 54 (Motorrad) Kreuzungsanfahrten wurden acht so konstruiert, dass es zu einer Kollision kommen könnte, wenn beide Konfliktpartner die vorgeschriebene Geschwindigkeit beibehielten. Die Frage war nun, wie sich das Fahrverhalten bei unterschiedlicher Ausstattung verändert. Aus der Datenanalyse ging hervor, dass die Kreuzkorrelation als lineare Analyseverfahren keine Unterschiede in den Versuchsbedingungen detektieren konnte. Als Grund hierfür wird angenommen, dass im Gegensatz zu den Versuchen mit Fußgängern, sich die Konfliktpartner erst recht spät (im Kreuzungsbereich) gesehen haben und in einem sehr kurzen Zeitraum aufeinander reagieren konnten. Die nichtlineare Analyseverfahren CRQA, insbesondere deren Maße Rekurrenzrate, Determinismus und durchschnittliche diagonale Linienlänge, waren sensitiv genug, Unterschiede in den Versuchsbedingungen (Ausstattungsgrad hinsichtlich des Assistenzsystems) festzustellen.

² Joint First Authorship: Michael Walz und Christian Lehsing haben zu gleiche Teilen zu dieser Publikation beigetragen

³ Durchgeführt von Sebastian Will, Magdalena Sich, WIVW GmbH

L.2 Pedestrian Simulators for Traffic Research: State of the Art and Future of a Motion Lab

Feldstein, I.T., Lehsing, C., Dietrich, A. & Bengler, K. (2018). Pedestrian Simulator for Traffic Research: State of the Art and Future of a Motion Lab. *International Journal of Human Factors Modeling and Simulation*, 7(1). DOI: 10.1504/IJHFMS.2018.096128.

Der klassische Ansatz der Fahrsimulation stellt den motorisierten Fahrer und sein Verhalten in alltäglichen oder Sondersituationen in den Fokus. Üblicherweise folgen die ihn in der Simulation umgebenden Verkehrsteilnehmer Verhaltensmodellen oder vorprogrammierten Skripten. Im Bereich der urbanen Mobilität und der Entwicklung von Assistenzsystemen für den städtischen Raum spielen aber weitaus mehr Faktoren als das Fahrerverhalten eine entscheidende Rolle. Die Wechselwirkungen und Verhaltensanpassungen (oder auch Nicht-Anpassungen) an das Verhalten des Fahrers tragen zur Sicherheit und Effizienz des Gesamtverkehrssystems maßgeblich bei. Ein Perspektivwechsel hin zu anderen Verkehrsteilnehmern bietet damit die Chance, die Faktoren zu identifizieren, die einen risikoarmen, wirtschaftlichen und nachhaltigen Verkehrsfluss unterstützen können.

Einen solchen Perspektivwechsel ermöglichen die in dieser Veröffentlichung beschriebenen Fußgängersimulatoren. Der im Bewegungslabor des Lehrstuhls für Ergonomie entwickelte Simulator wurde in verschiedenen Ausbaustufen in den vorhergenannten Studien (Kapitel 2, 3, 4 und 5) erfolgreich eingesetzt. Es ist möglich, diesen als Einzelsimulator für fußgängerzentrierte Fragestellungen einzusetzen aber zusätzlich dazu auch im Verbund mit einem Fahrsimulator im Rahmen der beschriebenen vernetzten Fahrsimulation (Kapitel 1.4.2).

Erste Untersuchungen mit dem Simulator haben einen Gewöhnungseffekt aber auch einen Unterschied in der Gehgeschwindigkeit der Versuchsteilnehmer gezeigt, wenn diese das Head-Mounted Display (HMD) trugen im Vergleich zu Durchgängen ohne HMD. Im Gegensatz dazu haben sich der Einsatz eines Head-Mounted Displays sowie die Selbstwahrnehmung des Versuchsteilnehmers in der virtuellen Welt durch den dargestellten Avatar in ersten Vorstudien als positive Eigenschaften zur Erhöhung der Immersionsfähigkeit des Simulators erwiesen.

Literaturverzeichnis

- ADAC. (2018). *2018 mehr Menschen bei Verkehrsunfällen getötet*. Retrieved from <https://www.adac.de/der-adac/verein/aktuelles/bilanz-verkehrstote/>
- Baader, A., & Binder, D. (2010). Sicher zur Schule – sicher nach Hause. In Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (Ed.), *DGUV Lernen und Gesundheit. Sicher auf dem Weg zur Schule*. Wiesbaden: Universum Verlag GmbH.
- Berkel, K. (1997). *Konflikttraining: Konflikte verstehen, analysieren, bewältigen*. Heidelberg.
- Blana, E. (1996). *A Survey of Driving Research Simulators Around the World: Working Paper 481*, Institute of Transport Studies, University of Leeds.
- Böhm, R. (2003). *Konfliktmanagement: Eine Einführung*. Skriptum zum Seminar Soziale Kompetenz (SK 4) der Bildungsarbeit des Österreichischen Gewerkschaftsbundes.
- Bossel, H. (1992). *Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E., & Vollrath, M. (Eds.). (2015). *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer.
- Bundesanstalt für Straßenwesen. (2018). *Verkehrs- und Unfalldaten: Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland*. Retrieved from https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Medien/VU-Daten/VU.html?nn=1820340
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (2018). *StVO - Straßenverkehrs-Ordnung: Textausgabe mit Erläuterungen, Allgemeiner Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung, verkehrsrechtlichen Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Ferienreiseverordnung sowie ausgewählten Ausnahmeverordnungen* (25., neu bearbeitete Auflage, Stand: Oktober 2017). Heidelberg: C.F. Müller.
- Carter, T. L. (1994). Age-related vision changes: a primary care guide. *Geriatrics (Basel, Switzerland)*, 49(9), 37–42.
- Casdagli, M. C. (1997). Recurrence plots revisited. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 108(1-2), 12–44. doi:10.1016/S0167-2789(97)82003-9
- Chatfield, C. (2013). *The Analysis of Time Series: An Introduction, Sixth Edition* (6th ed.). Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science. Hoboken: CRC Press.
- Clauß, G., Kulka, H., Lompscher, J., Rösler, H.-D., Timpe, K.-P., & Vorweg, G. (Eds.). (1976). *Wörterbuch der Psychologie*. Köln: Pahl-Rugenstein.
- Cooper, P. J. (1984). Experience with Traffic Conflicts in Canada with Emphasis on “Post Encroachment Time” Techniques. In E. Asmussen (Ed.), *NATO ASI Series, Series F: Computer and Systems Sciences: Vol. 5. International Calibration Study of Traffic Conflict Techniques* (pp. 75–96). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Deehy, P. T. (1968). Sociology and road safety, The Engineering Institute of Canada. In *Proceedings of a Seminar, Royal Military College, Kingston*. Ontario.

- Eckmann, J. P., Kamphorst, S. O., & Rülle, D. (1987). Recurrence plots of dynamical systems. *Europhysics Letter*, *4*(9), 973–977.
- Enfield, N. J., & Sidnell, J. (2018). Interaction. In Hilary Callan (Ed.), *The International Encyclopedia of Anthropology*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Färber, B. (2015). Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern. In M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, & H. Winner (Eds.), *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte* (pp. 127–146). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer Vieweg.
- Feldstein, I., Dietrich, A., Milinkovic, S., & Bengler, K. (2016). A Pedestrian Simulator for Urban Crossing Scenarios. *IFAC-PapersOnLine*, *49*(19), 239–244. doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.531
- Feldstein, I. T., Lehsing, C., Dietrich, A., & Bengler, K. (2018). Pedestrian simulators for traffic research: State of the art and future of a motion lab. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, *6*(4), 250. doi:10.1504/IJHFMS.2018.096128
- Fella, B. (2018). *Objektive und subjektive Quantifizierung der Kooperationsleistung beim Fahrstreifenwechsel* (Masterarbeit). Technische Universität München, München.
- Field, A. (2009). *Discovering statistics using SPSS*. Sage publications.
- Fisher, D. L., Rizzo, M., Caird, J., & Lee, J. D. (2017). *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. CRC Press.
- Fisher, D. L., Rizzo, M., Caird, J., & Lee, J. D. (Eds.). (2011). *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology*. Hoboken: CRC Press.
- Forgas, J. P. (1999). *Soziale Interaktion und Kommunikation: Eine Einführung in die Sozialpsychologie* (4. Aufl.). Weinheim: Beltz, Psychologie-Verl.-Union.
- Fritz, J., Gabler, B., & Quitmann, H. H.W. (1975). *Interaktionspädagogik: Methoden und Modelle*. München: Juventa verlag.
- Galton, F. (1888). Co-Relations and Their Measurement, Chiefly from Anthropometric Data. *Proceedings of the Royal Society of London*, *45*(273-279), 135–145. doi:10.1098/rspl.1888.0082
- Haegerstrom-Portnoy, G., Schneck, M. E., & Brabyn, J. A. (1999a). Seeing into old age: vision function beyond acuity. *Optometry and Vision Science*, *76*(3), 141–158.
- Haegerstrom-Portnoy, G., Schneck, M. E., & Brabyn, J. A. (1999b). Seeing into old age: vision function beyond acuity. *Optometry and Vision Science*, *76*(3), 141–158.
- Hancock, P. A., & de Ridder, S. (2003). Behavioral response in accident-likely situations. *Ergonomics*, *46*(12), 1111–1135.
- Hartung, J., Elpelt, B., & Klösener, K. H. (2009). *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. De Gruyter. Retrieved from https://books.google.de/books?id=X9_nBQAAQBAJ
- Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, *51*(5), 4282.

- Houtenbos, M. (2008). *Expecting the unexpected. A study of interactive driving behaviour at intersections* (Dissertation). Technische Universität Delft, Delft.
- Hupfer, C. (1997). *Computergestützte Videobildverarbeitung zur Verkehrssicherheitsarbeit. am Beispiel von Fußgängerquerungen an städtischen Hauptverkehrsstraßen* (Dissertation). Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- Hydén, C. (1987). *The development of a method for traffic safety evaluation: the Swedish traffic conflict technique* (Dissertation). Lund Universität, Lund.
- Juhlin, O. (2001). *Traffic behavior as social interaction: implications for the design of artificial drivers* (Sociologist Arbok No. 1).
- Katz, A., Zaidel, D., & Elgrishi, A. (1975). An Experimental Study of Driver and Pedestrian Interaction during the Crossing Conflict. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 17(5), 514–527. doi:10.1177/001872087501700510
- Klix, F. (1971). *Information und Verhalten: Kybernetische Aspekte der organismischen Informationsverarbeitung*. Berlin: VEB.
- Köck, P., & Ott, H. (1997). *Wörterbuch für Erziehung und Unterricht* (5. Aufl.). Donauwörth: Auer.
- Kotte, J., & Pütz, A. (2017). Methodology and Results for the Investigation of Interactions Between Pedestrians and Vehicles in Real and Controlled Traffic Conditions. In K. Bengler, S. Hoffmann, D. Manstetten, A. Neukum, & J. Drücke (Eds.), *UR:BAN Human Factors in Traffic Approaches for Safe Efficient and Stressfree Urban Traffic* (pp. 291–310). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kraftfahrtbundesamt. (2018). *Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2018*. Retrieved from https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html
- Krappmann, L. (2000). *Soziologische Dimensionen der Identität: Strukturelle Bedingungen für die Teilnahme an Interaktionsprozessen* (9., in der Ausstattung veränd. Aufl.). *Veröffentlichungen des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Krause, B. (2015). *Ökologische Validität Einordnung und Probleme*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/266174437_Okologische_Validitat_Einordnung_und_Probleme
- Lehsing, C., & Feldstein, I. T. (2018). Urban Interaction – Getting Vulnerable Road Users into Driving Simulation. In K. Bengler, J. Drücke, & S. Hoffmann (Eds.), *ATZ/MTZ-Fachbuch. UR:BAN human factors in traffic. Approaches for safe, efficient and stress-free urban traffic* (pp. 347–362). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Martin, P., Bateson, P. P. G., & Bateson, P. (1993). *Measuring behaviour: an introductory guide*. Cambridge University Press.
- Marwan, N., Romano, C. M., Thiel, M., & Kurths, J. (2007). Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*, 438(5-6), 237–329. doi:10.1016/j.physrep.2006.11.001

- Minderhoud, M. M., & Bovy, P. H.L. (2001). Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. *Accident Analysis & Prevention*, *33*(1), 89–97. doi:10.1016/S0001-4575(00)00019-1
- Minsal, B., & Roth, W. K. (1978). *Soziale Interaktion in der Schule* (1. Aufl., Bd. 5). München, Wien, Baltimore: Urban und Schwarzenberg.
- Mühlbacher, D., Zimmer, J., Fischer, F., & Krüger, H.-P. (2011). The multi-driver simulator – a new concept of driving simulation for the analysis of interactions between several drivers. In D. d. Waard, N. Gérard, L. Onnasch, R. Wiczorek, & D. Manzey (Eds.), *Human centred automation* (pp. 147–158). Maastricht: Shaker Publishing B.V.
- Mullen, N., Charlton, J., Devlin, A., & Bedard, M. (2011). Simulator Validity: Behaviors Observed on the Simulator and on the Road. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. Caird, & J. D. Lee (Eds.), *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (13-1 - 13-18). Hoboken: CRC Press.
- Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de physique I*, *2*(12), 2221–2229.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality: Principles and implications of cognitive psychology* ([3rd print.]). *A series of books in psychology*. San Francisco: Freeman.
- Olson, P. L. (1996). *Forensic Aspects of Driver Perception and Response*. Tucson, AZ: Lawyers & Judges Publishing Company, Inc.
- Pearson, K. (1920). Notes on the History of Correlation. *Biometrika*, *13*(1), 25. doi:10.2307/2331722
- Phillips, N. D. (2018). *YaRrr! The Pirate's Guide to R*. Retrieved from <https://bookdown.org/ndphillips/YaRrr/>
- Reztsov, A. (2017). Strengths and Limitations of Cellular-Automata Models and SOTL for the Realistic Representing of Traffic Flow. *SSRN Electronic Journal*. doi:10.2139/ssrn.2897916
- Richardson, B. C. (1984). Use of mathematical models in automotive transportation policy analysis: A case study. *Technological Forecasting and Social Change*, *26*(3), 243–254. doi:10.1016/0040-1625(84)90011-8
- Richardson, B. C., Joscelyn, K. B., & Saalberg, J. H. (1979). *Limitations on the Use of Mathematical Models in Transportation Policy Analysis*. Ann Arbor, Mich: UMI Research Press, an imprint of University Microfilms International.
- Rodgers, J. L., & Nicewander, A. W. (1988). Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient. *The American Statistician*, *42*(1), 59–66. doi:10.1080/00031305.1988.10475524
- Rosenfeld, D. (2016). *Abgelenkte Fußgänger – ein Risiko im Straßenverkehr*. Retrieved from <https://www.mobileye.com/de-de/abgelenkte-fusganger-ein-risiko-im-strasenverkehr/>
- Saifuzzaman, M., & Zheng, Z. (2014). Incorporating human-factors in car-following models: A review of recent developments and research needs. *Transportation Research Part C*,

- Schindler, J., Harms, C., Noyer, U., Richter, A., Flemisch, F., Köster, F., . . . Gruyer, D. (2011). JDVE - A Joint Driver-Vehicle-Environment Simulation Platform for the Development and Accelerated Testing of Automotive Assistance and Automation Systems. In P. C. Cacciabue (Ed.), *Human modelling in assisted transportation. Models, tools and risk methods* (pp. 233–240). Milano: Springer.
- Schmuckler, M. A. (2001). What Is Ecological Validity?: A Dimensional Analysis. *Infancy*, 2(4), 419–436. doi:10.1207/S15327078IN0204_02
- Schroeder, B. J. (2008). *A Behavior-Based Methodology for Evaluating Pedestrian-Vehicle Interaction at Crosswalks* (Dissertation). North Carolina State University, Raleigh, NC, USA.
- Schwanen, T., & Ziegler, F. (2011). Wellbeing, independence and mobility: An introduction. *Ageing & Society*, 31(5), 719–733. doi:10.1017/S0144686X10001467
- Simmel, G. (1890). Über sociale Differenzierung: soziologische und psychologische Untersuchungen. In G. Schmoller (Ed.), *Staats- und socialwissenschaftliche Forschungen*. Leipzig: Duncker & Humblot.
- Swan, L. A., & Owens, M. B. (1988). The social psychology of driving behavior: communicative aspects of joint-action. *Mid-American Review of Sociology*, 13(1), 59–67.
- Taehyun, K., Lovell, D. J., & Park, Y. (2003). Limitations of Previous Models on Car-Following Behavior and Research Needs. In *Proceedings of the 82th Transportation Research Board Annual Meeting*.
- Trivedi, M. M. (2016, November). *Looking at Humans in the Age of Self Driving Vehicles*. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Keynote at IEEE ITSC, Rio de Janeiro.
- Twaddle, H. A. (2017). *Development of tactical and operational behaviour models for bicyclists based on automated video data analysis* (Dissertation). TU München, München.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables* (Working Paper No. ESA/P/WP/248).
- van der Horst, R., & Hogema, J. (1993). TIME-TO-COLLISION AND COLLISION AVOIDANCE SYSTEMS. In *Proceedings of the 6th ICTCT Workshop* (pp. 1–12). Salzburg.
- Verband für bürgernahe Verkehrspolitik e.V. (2018a). *Bußgeldkatalog 2018: Fußgängerüberweg – der Zebrastreifen*. Retrieved from <https://www.bussgeldkataloge.eu/deutschland/fussgaengerueberweg.html>
- Verband für bürgernahe Verkehrspolitik e.V. (2018b). *Unfallstatistik für Deutschland - Verkehrsrecht 2018*. Retrieved from https://www.bussgeldkatalog.org/unfallstatistik/#wie_of_t_werden_fussgaenger_laut_unfallstatistik_in_unfaelle_verwickelt

- Walz, M., Lehsing, C., Bengler, K., Will, S., & Sich, M. (2017). Impacts of an Intersection Assistance System. In ACM (Ed.), *Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering* (pp. 279–286). New York, NY: ACM.
- Weaver, W. (1949). THE MATHEMATICS OF COMMUNICATION. *Scientific American*, 181(1), 11–15.
- Wiedemann, R. (1974). Simulation des Straßenverkehrsflusses. *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe*, (8).
- Wilde, G. J. S. (1976). Social Interaction Patterns in Driver Behavior: An Introductory Review. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 18(5), 477–492. doi:10.1177/001872087601800506
- Will, S. (2017). A new approach to investigate Powered Two Wheelers' interactions with passenger car drivers: the Motorcycle - Car Multi-Driver Simulation. In K. Bengler, S. Hoffmann, D. Manstetten, A. Neukum, & J. Drücke (Eds.), *UR:BAN Human Factors in Traffic Approaches for Safe Efficient and Stressfree Urban Traffic*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Will, S., Mark, C., Neukum, A., & Kaussner, A. (2014). Motorcycle-car multi-driver simulation - A new methodological approach towards increased powered two wheeler safety. *Forschungshefte Zweiradsicherheit*, (16).
- Wisselmann, D., Gresser, K., Spannheimer, H., Bengler, K., & Huesmann, A. (2004). Connected Drive - ein methodischer Ansatz für die Entwicklung zukünftiger Fahrerassistenzsysteme. In *1. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München: TÜV Akademie GmbH.
- World Health Organization. (2018). *Global Status Report on Road Safety 2018*. Genf.
- Yanovitzky, I., & VanLear, A. (2008). Time Series Analysis: Traditional and Contemporary Approaches. In A. F. Hayes, M. D. Slater, & L. B. Snyder (Eds.), *The Sage sourcebook of advanced data analysis methods for communication research* (pp. 89–124). Thousand Oaks, Calif.: Sage.