
Die Pulksimulation als Methode zur Untersuchung verkehrspsychologischer Fragestellungen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Philosophischen Fakultät II
der Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Vorgelegt von
Dipl.-Psych. Dominik Mühlbacher
aus Würzburg

2013

Erstgutachter: Prof. Dr. Mark Vollrath

Zweitgutachter: Prof. Dr. Wilfried Kunde

Tag des Kolloquiums: 06. Dezember 2013

DANKSAGUNG

Zuallererst möchte ich mich bei Prof. Dr. Hans-Peter Krüger bedanken. Durch seine Idee, eine vernetzte Fahrsimulation aufzubauen, konnte diese Arbeit überhaupt erst ermöglicht werden. Danke für die Diskussionen der Untersuchungen sowie die Betreuung in den ersten Jahren dieser Arbeit!

Weiterhin möchte ich Prof. Dr. Mark Vollrath dafür Dank sagen, dass er die Betreuung der Arbeit ohne Zögern übernommen hat und mir hierbei wertvolle Hinweise und Ratschläge geben konnte! Danke auch an Prof. Dr. Wilfried Kunde, der sich zur Zweitbetreuung bereit erklärt und sich für die externe Betreuung meiner Arbeit eingesetzt hat.

Ein besonderer Dank gilt Susanne Buld, die während der gesamten Erstellung der Arbeit stets ein offenes Ohr für mich hatte. Die vielen Diskussionen und die hier entstandenen Ideen haben sicherlich sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Darüber hinaus möchte ich auf keinen Fall ihre Motivierung und Aufmunterung vergessen, die während einiger Phasen der Dissertationserstellung ungemein wichtig für mich waren!

Weiterhin möchte ich folgenden Praktikanten, Bacheloranden und studentischen Hilfskräften für ihre stets zuverlässige Unterstützung in den vorgestellten Studien Dank sagen: Julia Stumpf, Michael Überschär, Madeline Volk, Sebastian Will und Jutta Zimmer.

Ein weiterer Dank geht an mehrere meiner Kollegen, die mir durch ihre fachliche Unterstützung sehr bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben: Danke an Florian Fischer für die technische Umsetzung der entstandenen Ideen in Streckenprogrammierung und Versuchssteuerung. Ein herzlicher Dank geht an Sonja Hoffmann für die Probandenakquise, die aufgrund der Anzahl von vier Testfahrern pro Termin besonders aufwändig war! Danke auch an Rainer Scheuchenpflug für seine Hinweise in der Auswertung kleiner Stichproben und nicht-parametrischer Daten sowie an Andreas Landau für die Unterstützung der Datenaufbereitung mit MATLAB.

Bei Christiane Reichert und meinem Bruder Jörg möchte ich mich für das Korrekturlesen der Arbeit und die hilfreichen Kommentare hierbei bedanken!

Schließlich danke ich ganz besonders meinen Eltern, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg immer unterstützt und gefördert haben!

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG.....	VII
1 EINLEITUNG.....	10
2 THEORETISCHER HINTERGRUND.....	12
2.1 Bestehende Untersuchungsmethoden.....	12
2.1.1 Kriterien zur Bewertung von Untersuchungsmethoden.....	12
2.1.2 Studien mit realen Fahrzeugen.....	15
2.1.3 Fahrsimulation.....	18
2.1.4 Verkehrssimulation.....	22
2.1.5 Vergleich der Methoden.....	25
2.2 Die Pulksimulation.....	28
2.2.1 Bisherige Studien in vernetzten Fahrsimulationen.....	28
2.2.2 Vergleich zu den bestehenden Untersuchungsmethoden.....	32
3 ZENTRALE FRAGESTELLUNG.....	34
4 AUFBAU DER PULKSIMULATION.....	36
4.1 Fahrstationen.....	36
4.2 Datenaufzeichnung.....	37
4.3 Operatorenplatz.....	38
5 TRAINING FÜR DIE PULKSIMULATION.....	40
5.1 Hintergrund und Fragestellung.....	40
5.2 Methodik und Ablauf.....	40
5.2.1 Fahrt 1: Einzelfahrt auf Landstraße.....	41
5.2.2 Fahrt 2: Pulkfahrt auf Landstraße.....	41
5.2.3 Fahrt 3: Bremsen, Beschleunigen und Fahrspurwechsel.....	42
5.2.4 Fahrt 4: Pulkfahrt auf der Autobahn.....	42
5.2.5 Befragungen.....	42
5.2.6 Versuchsleitung.....	43

5.3	Ergebnisse	43
5.3.1	Effekte des Trainings	44
5.3.2	Simulatorübelkeit und körperliche Beschwerden.....	44
5.3.3	Effekte des Fahrens im Pulk.....	44
5.3.4	Offene Kommentare.....	45
5.3.5	Zusammenfassung.....	46
6	ERSTE UNTERSUCHUNGSANSÄTZE	47
6.1	Ziel der ersten Untersuchungsansätze.....	47
6.2	Methodik.....	47
6.2.1	Fahraufgabe	47
6.2.2	Versuchsstrecken	48
6.2.3	Experimentelle Manipulationen.....	52
6.2.4	Stichprobe	53
6.3	Fragestellungen	54
6.3.1	Wie unterscheidet sich eine Pulkfahrt von einer Einzelfahrt?	54
6.3.2	Welchen Einfluss haben nachfolgende Fahrzeuge im Pulk?.....	59
6.3.3	Welche Effekte haben Positionierungen im Pulk?.....	61
6.3.4	Wie unterscheiden sich reale Fahrer und Modelle im Pulk?	68
6.3.5	Wie wirkt sich die Einführung einer Nebenaufgabe auf den Pulk aus?.....	72
6.3.6	Wie wirken sich verschiedene Abstandsinstruktionen aus?.....	76
6.3.7	Mit welchen Parametern können Pulks beschrieben werden?	80
6.3.8	Wie kann das Verhalten des Pulks an Kreuzungen untersucht werden?.....	90
6.4	Zusammenfassung und Diskussion.....	92
7	INHALTLICHE ANWENDUNGEN DER PULKSIMULATION.....	94
7.1	Evaluierung eines Gefahrenwarners.....	95
7.1.1	Fragestellung.....	95
7.1.2	Methodik.....	95
7.1.3	Ergebnisse.....	99
7.1.4	Zusammenfassung und Diskussion	103
7.2	Evaluierung eines Ampelphasenassistenten	105
7.2.1	Fragestellung.....	105
7.2.2	Methodik.....	106
7.2.3	Ergebnisse.....	112

7.2.4 Zusammenfassung und Diskussion.....	122
8 DISKUSSION: ANFORDERUNGEN AN DIE VERSUCHSSTADIEN	125
8.1 Problembildung.....	125
8.1.1 Geeignete Fragestellungen für die Pulksimulation.....	125
8.1.2 Bestimmung des Mehrwerts der Pulksimulation.....	128
8.2 Versuchsplanung.....	130
8.2.1 Interaktionen durch den Streckenbau.....	130
8.2.2 Interaktionen durch den Umgebungsverkehr.....	131
8.2.3 Interaktionen durch die Instruktion.....	132
8.3 Versuchsaufbau.....	132
8.3.1 Räumlichkeiten.....	132
8.3.2 Aufbau einer Fahrstation und Simulationsumgebung.....	133
8.3.3 Anzahl an Fahrstationen.....	134
8.4 Versuchsdurchführung.....	135
8.4.1 Instruktion.....	135
8.4.2 Operatorenplatz und Versuchsleitung.....	135
8.4.3 Erfassung subjektiver Daten.....	136
8.5 Datenanalyse.....	136
8.5.1 Möglichkeiten der Datenerfassung und -darstellung.....	136
8.5.2 Parameter zur Beschreibung des gesamten Pulks.....	138
8.5.3 Parameter zur Beschreibung von Interaktionen.....	139
8.6 Dateninterpretation.....	140
8.6.1 Interne Validität der Ergebnisse.....	140
8.6.2 Externe Validität der Ergebnisse.....	142
9 AUSBLICK	145
10 LITERATURVERZEICHNIS.....	147
11 ANHANG.....	154

ZUSAMMENFASSUNG

Fahr- und Verkehrssimulation sind neben Studien mit realen Fahrzeugen die gängigen Methoden der empirischen Verkehrswissenschaft. Während sich die Fahrsimulation mit dem Erleben und Verhalten von Fahrern beschäftigt, untersucht die Verkehrssimulation das gesamte Verkehrssystem. Der Bereich zwischen diesen Polen „Fahrer“ und „Verkehr“, in dem Fahrer aufeinander treffen und miteinander interagieren, ist angesichts der Bedeutung sozialer Prozesse für das Erleben und Verhalten ein wichtiger Aspekt. Allerdings wurde dieser Bereich in der Verkehrswissenschaft bisher nur unzureichend abgebildet. Auch in der Fahr- und Verkehrssimulation wurde dieser Aspekt bislang weitgehend vernachlässigt.

Um diese Lücke zu schließen, wurde mit der Pulksimulation eine neue Versuchsumgebung entwickelt. Sie besteht aus miteinander vernetzten Fahr simulatoren und ermöglicht es, Interaktionsfragestellungen zu untersuchen. Jedoch bringt die Anwendung der Pulksimulation neue Anforderungen an den Untersucher mit sich, die bei der Fahr- bzw. Verkehrssimulation nicht notwendig sind und für die Pulksimulation neu entwickelt werden müssen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, diese Methode zur Untersuchung verkehrspsychologischer Fragestellungen weiterzuentwickeln, zu prüfen und zu etablieren.

In ersten Untersuchungsansätzen werden in acht Teilstudien die grundlegenden methodischen Besonderheiten der Pulksimulation am Beispiel des Folgefahrens und des Kreuzens betrachtet. Hierbei wird auch stets der Vergleich zu den bisher genutzten Versuchsumgebungen Einzelfahrsimulation und Verkehrssimulation gezogen. Folgende Fragestellungen wurden im Rahmen dessen beantwortet:

- (1) Wie unterscheidet sich eine Pulkfahrt von einer Einzelfahrt?
Im Pulk müssen sich verschiedene Fahrer auf einen Fahrstil einigen. Daher wird insgesamt langsamer gefahren, während die Spurhaltung unverändert bleibt. Die Probanden bewerten eine Pulkfahrt als beanspruchender, aber auch als realistischer.
- (2) Welchen Einfluss haben nachfolgende Fahrzeuge im Pulk?
Auch für die Fahrer an erster Position ist das Fahren im Pulk anspruchsvoller. Zudem wird eine gewählte Geschwindigkeit konstanter gehalten als in einer Einzelfahrt.
- (3) Welche Effekte haben Positionierungen im Pulk?
Beim Folgefahren ist der Ziehharmonika-Effekt zu beobachten: Weiter hinten fahrende Fahrer im Pulk bremsen stärker und benötigen höhere maximale Geschwindigkeiten. In sicherheitskritischen Situationen steigt die Variabilität der Situation mit zunehmender Positionierung im Pulk.

- (4) Wie unterscheiden sich reale Fahrer und Modelle im Pulk?
Fahrermodelle können nicht das reale Fahren im Pulk abbilden. Dies zeigen das Fahrverhalten, bei dem z. B. der Ziehharmonika-Effekt fast komplett fehlt, sowie die Beurteilungen der Probanden.
- (5) Wie wirkt sich die Einführung einer Nebenaufgabe auf den Pulk aus?
Eine kognitive Nebenaufgabe führt zu einer negativeren Fahrtbeurteilung, bringt aber einen positiven Effekt bezüglich der Spurhaltung mit sich. Dieser Effekt steigt mit zunehmender Anzahl von Vorderfahrzeugen im Pulk an. Die neu entwickelten Parameter laterale Distanz und $SDLP_{\text{Pulk}}$ bilden den Effekt der Nebenaufgabe auf die Querführung für das Gesamtsystem Pulk ab.
- (6) Wie wirken sich verschiedene Abstandsinstruktionen aus?
Mit verschiedenen Instruktionen zum Folgefahren kann das Abstandsverhalten im Pulk variiert werden. Diese Variationen können für den gesamten Pulk mit Hilfe der neu generierten Parameter Pulklänge und THW_{Pulk} gezeigt werden.
Das instruierte Folgeverhalten führt dazu, dass auch bei größeren Abständen zum Vorderfahrzeug kein freies Fahren vorliegt. Dies unterscheidet sich zum Fahren im realen Verkehr, bei dem die Abhängigkeiten zwischen den Fahrern mit zunehmendem Abstand deutlich abnehmen.
- (7) Mit welchen Parametern kann der Pulk beschrieben werden?
Mit den neu entwickelten Kenngrößen laterale Distanz, $SDLP_{\text{Pulk}}$, Pulklänge und THW_{Pulk} ist es möglich, Variationen experimenteller Manipulationen auf Pulkebene darzustellen und zu quantifizieren. Als Beispiel für die Nutzung der Parameter wird die Evaluation von Fahrerassistenzsystemen hinsichtlich verschiedener Ausstattungs-raten aufgezeigt.
- (8) Wie kann das Verhalten des Pulks an Kreuzungen untersucht werden?
In der Pulksimulation können echte Interaktionen zwischen Fahrern an einer Kreuzung beobachtet werden. Hilfreich ist hier eine geeignete Streckenführung, bei der die Fahrer gleichzeitig aufeinandertreffen. Mit Hilfe von Zeit-Weg-Diagrammen ist es möglich, diese Interaktionen zu beschreiben.

Schließlich werden zwei Anwendungsbeispiele der Pulksimulation zu aktuell relevanten Themen aufgezeigt. In der ersten Untersuchung wird ein Gefahrenwarner evaluiert, der vor Bremsungen vorausfahrender Fahrzeuge warnt. Während Fahrer direkt hinter dem bremsenden Fahrzeug vom System nicht profitieren, steigt der Nutzen des Systems mit zunehmender Positionierung im Pulk an.

In einer zweiten Studie wird ein Ampelphasenassistent untersucht. Dieser informiert den Fahrer während der Annäherung an eine Ampel über die optimale Geschwindigkeit, mit der diese Ampel ohne Halt bei Grün durchfahren werden kann. Um die Auswirkungen des Systems auf den nicht-assistierten Umgebungsverkehr bestimmen zu können, werden verschiedene Ausstattungs-raten innerhalb des Pulks eingeführt. Mit diesem Untersuchungsansatz können gleichzeitig Effekte des Systems auf die assistierten Fahrer (z. B. Befolgungsver-

halten), die nicht-assistierte Fahrer (z. B. Ärger) sowie das Verkehrssystem (z. B. Verkehrsfluss) bestimmt werden. Der Ampelphasenassistent resultiert in einem ökonomischeren Fahrverhalten der assistierten Fahrer, erhöht aber gleichzeitig in gemischten Ausstattungsraten den Ärger der nicht-assistierte Fahrer im Verkehrssystem. Erst bei Vollausrüstung entwickelt sich dieser negative Effekt zurück.

Die in den Anwendungsbeispielen berichteten Phänomene sind durch Untersuchungen in einer Einzelfahrsimulation oder Verkehrssimulation nicht beobachtbar. Insbesondere für die Untersuchung von Fragen, in denen soziale Interaktionen mit anderen Fahrern eine Rolle spielen, zeichnet sich die Pulksimulation in besonderer Weise aus. Hierfür liefert die Anwendung in der Pulksimulation zusätzliche Informationen und zeigt somit, dass die Pulksimulation das Methodeninventar in der Verkehrswissenschaft effektiv ergänzt. Sie stellt zum einen eine Erweiterung der Fahrsimulation um den Faktor „Verkehr“ und zum anderen eine Erweiterung der Verkehrssimulation um den Faktor „Mensch“ dar und wird so zu einem zentralen Bindeglied beider Versuchsumgebungen.

Darüber hinaus erlaubt die Pulksimulation die Modellierung von Interaktionsverhalten im Straßenverkehr, was bisher nicht bzw. nur unter größtem Aufwand realisierbar war. Hierdurch können die Modelle der Fahr- und Verkehrssimulation weiterentwickelt werden.

Mit den in dieser Arbeit neu entworfenen Parametern werden Kenngrößen zur Verfügung gestellt, die Variationen bezüglich Quer- und Längsführung auch auf Ebene des Pulks abbilden können. Weitere neu entwickelte Parameter sind in der Lage, Interaktionen über den Zeitverlauf zu beschreiben. Diese Parameter sind notwendig für den Einsatz der Pulksimulation in zukünftigen Untersuchungen.

Zusammenfassend wurde in der vorliegenden Arbeit die Methodik der Pulksimulation für den gesamten Anwendungsprozess von der Fragestellung bis hin zur Interpretation der Ergebnisse weiterentwickelt. Der Mehrwert dieser Methode wurde an aktuellen und bisher nicht untersuchbaren Fragestellungen belegt und somit die Validität der Pulksimulation gestärkt. Die vorgestellten Untersuchungen zeigen das große Potenzial der Pulksimulation zur Bearbeitung von Fragen, die auf der Interaktion verschiedener Verkehrsteilnehmer basieren. Hierdurch wird erstmals die Möglichkeit geschaffen, soziale Interaktionen über den Zeitverlauf in die Fahrermodelle der Verkehrssimulation zu integrieren. Damit ist der Brückenschlag von der Fahr- zur Verkehrssimulation gelungen.

1 EINLEITUNG

Seit vielen Jahren werden Fahr- und Verkehrssimulation als gängige Methoden zur Untersuchung verkehrswissenschaftlicher Fragen erfolgreich eingesetzt: In der Fahrsimulation steuert ein einzelner Proband ein virtuelles Fahrzeug durch eine simulierte Szenerie. Ihre Untersuchungsschwerpunkte liegen im Erleben und Verhalten von Fahrern. Die Verkehrssimulation setzt dagegen ausschließlich modellierte Fahrer in einer virtuellen Umgebung ein. Bei ihr werden Fragen behandelt, die das gesamte Verkehrssystem betreffen.

Beide Methoden suchen immer nach Synergien. So werden in der Verkehrssimulation Verhaltensmodelle eingesetzt, die aus der Fahrsimulation gewonnen wurden. In der Fahrsimulation wird ein dem Ego-Fahrzeug umgebender Verkehr simuliert, der nicht selten an den Möglichkeiten großer Verkehrssimulationen orientiert ist.

Zwischen diesen beiden Polen „Fahrer“ und „Verkehr“ gibt es allerdings noch weitere Aspekte, die bisher nicht betrachtet wurden. Soziale Interaktionen sind ein zentraler Bestandteil des Lebens und haben auch im Straßenverkehr eine wichtige Bedeutung. Sie entstehen immer dann, wenn zwei oder mehr Fahrer aufeinander treffen. Diese Begegnungen führen dazu, dass die Fahrer die Intentionen und das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer berücksichtigen und darauf reagieren müssen. Hierdurch bildet sich ein Pulk aus Fahrern, die somit zwangsläufig zur gemeinsamen Interaktion gezwungen sind (siehe Abbildung 1).

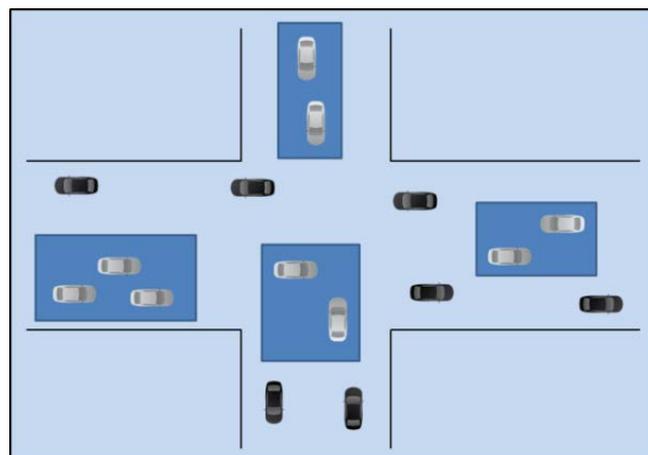


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Gesamtverkehrs (hellblau), der wiederum aus zeitweise miteinander in Pulks interagierenden Fahrern (dunkelblau) und unabhängig vom übrigen Verkehr fahrenden Verkehrsteilnehmern (schwarz) besteht.

Soziale Interaktionen im Straßenverkehr sind manchmal sehr kurze Episoden (z. B. beim Queren an einer Kreuzung), sie können aber auch längerfristig sein (z. B. beim Folgefahren auf einer Landstraße). Interaktionen sind entscheidend für die Fahrsicherheit (z. B. bei Unfällen zwischen Verkehrsteilnehmern), den Verkehrsfluss (z. B. bei der Entstehung von Staus) sowie das Verkehrsklima (z. B. bei Aggression im Straßenverkehr). Aufgrund des immer höher werdenden Verkehrsaufkommens werden Pulk und die Interaktionen der beteiligten Fahrer in den nächsten Jahrzehnten eine immer größere Rolle spielen.

Mit den beiden vorhandenen Methoden Fahr- und Verkehrssimulation können Pulk bzw. ihre Interaktionen nur unzureichend untersucht werden. In der Fahrsimulation war die Untersuchung von Interaktionen bisher nicht möglich, da hier lediglich ein Fahrer eingesetzt wird. Natürlich wird in der Fahrsimulation auch modellierter Umgebungsverkehr eingesetzt, jedoch wird dieser der Variabilität und Flexibilität menschlichen Verhaltens im Straßenverkehr häufig nicht gerecht. So ist es bisher kaum möglich, dass simulierte Modelle ihr Fahrverhalten in Abhängigkeit von dem Verhalten der anderen Fahrer ändern. Stattdessen wird in den Modellen vordefiniertes Verhalten ausgeführt. Dies ist auch der Tatsache geschuldet, dass für eine adäquate Modellierung bisher nur sehr wenig über Interaktionen im Straßenverkehr bekannt ist – was wiederum daran liegt, dass die meisten bisher durchgeführten Studien zur Erfassung von Fahrverhalten immer nur einen realen Fahrer betrachtet haben.

In der Verkehrssimulation sind Fragestellungen zu Interaktionen zwischen Fahrern ebenfalls nicht untersuchbar, da die Fahrzeuge ausschließlich simuliert sind. Die verwendeten Modelle besitzen dieselben Einschränkungen wie im vorherigen Abschnitt genannt und der Faktor „Mensch“ wird hierbei nicht ausreichend berücksichtigt.

Als logische Folgerung solcher Überlegungen bleibt die Vernetzung mehrerer Fahrsimulationen, die aufgrund fortschreitender technologischer Entwicklungen erst seit neuerer Zeit realisierbar ist. Dieser Untersuchungsansatz wirft völlig neue Möglichkeiten der Zusammenführung von Fahr- und Verkehrssimulation auf. In einer vernetzten Fahrsimulation können mehrere menschliche Fahrer als Pulk in derselben virtuellen und kontrollierten Umgebung untersucht werden. Damit sind sowohl Fragestellungen untersuchbar, die bisher ein Schwerpunkt der Fahrsimulation waren, als auch Themen, die bisher von der Verkehrssimulation adressiert wurden. Aufgrund des Vorhandenseins realer Fahrer und damit realistischem Fahrverhalten können zudem Interaktionen untersucht werden. Eine sogenannte Pulksimulation würde zusätzlich den Faktor „Mensch“ stärker in die Verkehrssimulation integrieren und somit eine Brücke zwischen Fahr- und Verkehrssimulation darstellen.

Bislang gibt es kaum Erfahrung mit der Pulksimulation als Forschungswerkzeug. Daher ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, diese Methode zur Untersuchung verkehrspsychologischer Fragestellungen weiterzuentwickeln, zu prüfen und zu etablieren.

2 THEORETISCHER HINTERGRUND

Wie das einleitende Kapitel gezeigt hat, besteht durchaus Bedarf an der Untersuchung von Interaktionen im Straßenverkehr. In der Verkehrswissenschaft stehen bereits verschiedene Untersuchungsmethoden zur Verfügung, die im Folgenden eingehend betrachtet werden. Anschließend werden diese Methoden verglichen, wobei insbesondere die Eignung der Methode für Interaktionsfragestellungen im Vordergrund steht.

2.1 Bestehende Untersuchungsmethoden

Für die experimentelle Untersuchung verkehrswissenschaftlicher Fragestellungen werden derzeit drei Methoden genutzt:

- Studien mit realen Fahrzeugen (Kapitel 2.1.2)
- Fahrsimulation (Kapitel 2.1.3)
- Verkehrssimulation (Kapitel 2.1.4)

Um diese Methoden hinsichtlich ihrer Eignung zur Beantwortung einer Fragestellung vergleichen zu können, müssen zunächst Kriterien für die Bewertung dieser Methode definiert werden.

2.1.1 Kriterien zur Bewertung von Untersuchungsmethoden

Ein erstes Kriterium zur Evaluierung eines Verfahrens stellt die Validität dar. Bortz und Döring (2006) nennen interne und externe Validität als die entscheidenden Gütekriterien für die Bewertung von Untersuchungen: Ein Versuch gilt als intern valide, wenn Veränderungen der abhängigen Variable eindeutig auf Manipulationen der unabhängigen Variable zurückzuführen sind. Die interne Validität kann somit als die Eindeutigkeit der Interpretation des Ergebnisses bezeichnet werden. Positiv auf die interne Validität wirken sich kontrollierbare Bedingungen aus. Gefährdungen der internen Validität sind demzufolge alle Störeinflüsse, die nicht kontrolliert oder eliminiert werden können. Bezogen auf die Verkehrsforschung könnten dies z. B. Witterungseinflüsse oder Verkehrsdichte sein. Die externe Validität stellt dagegen den Grad der Generalisierbarkeit eines Untersuchungsergebnisses auf andere Personen, Situationen, Untersuchungsdesigns und/oder Zeitpunkte dar. Somit stellen vor allem eine Unnatürlichkeit der Untersuchungssituation als auch eine nicht repräsentative Stichprobe Bedrohungen der externen Validität dar.

Darüber hinaus werden stets Objektivität (Grad der Unabhängigkeit der Ergebnisse vom Untersucher) und Reliabilität (Grad der Genauigkeit, mit dem gemessen wird) als weitere Hauptgütekriterien zur Beurteilung von Testverfahren genannt (z. B. Lienert & Ratz, 1998). Allerdings sind diese eher speziell für eine einzelne Untersuchung zu betrachten und eine pauschale Beurteilung nicht möglich. So ist die Reliabilität beispielsweise abhängig von den verwendeten Messinstrumenten und die Objektivität abhängig vom Verhalten der Versuchsleiter und vom Vorgehen der auswertenden Personen.

Laurig und Luttmann (1988) nennen weiterhin Zumutbarkeit, Ökonomie sowie Rückwirkungsarmut als Nebengütekriterien für Messmethoden. Somit muss bei der Auswahl von Methoden darauf geachtet werden, dass die Probanden nicht in unzumutbare Situationen gebracht werden. Weiterhin muss das Verhältnis aus Kosten (zeitlicher und finanzieller Aufwand) und Nutzen berücksichtigt werden. Schließlich darf der Einsatz der Methode an sich keine Auswirkungen auf das zu Messende ausüben. Dieser Punkt wird häufig auch als Reaktivität bezeichnet und umfasst Störvariablen wie soziale Erwünschtheit oder Demand-Effekte (Bortz & Döring, 2006).

Breuer (2009) ergänzt diese Kriterienliste um den Sicherheitsaspekt und das Datenschutzrecht. Die Unversehrtheit aller betroffenen Personen sowie des eingesetzten Materials (z. B. Versuchsfahrzeuge, Messtechnik) darf durch die Messung auf keinen Fall beeinträchtigt werden. Darüber hinaus dürfen alle Daten nur mit dem ausdrücklichen Einverständnis der betroffenen Personen erhoben werden. Dieser Aspekt ist allerdings eher unabhängig von der Untersuchungsmethode zu diskutieren. Bezüglich dieser rechtlichen und ethischen Aspekte sind unbedingt die Richtlinien für psychologische Experimente einzuhalten (American Psychological Association, 1973).

Anund und Kircher (2009) untersuchten die Vor- und Nachteile verschiedener Methoden zur Evaluierung von Fahrerassistenzsystemen zur Warnung vor Schläfrigkeit und berücksichtigten hierbei verschiedene Kriterien. Die externe Validität wird von ihnen als wichtiges Kriterium genannt. Einen weiteren Aspekt stellt nach den Autoren die Kontrollierbarkeit als Grad der Kontrolle über das experimentelle Setting dar. Je größer die Kontrollierbarkeit, umso eher können konfundierende Störeinflüsse ausgeschlossen werden. Damit ist die interne Validität angesprochen. Als drittes Kriterium werden die verschiedensten Einschränkungen der Umgebungen genannt: Hier ist an ethische und rechtliche Grenzen bei sicherheitskritischen Untersuchungen zu denken, an technische Limitationen sowie an finanzielle Einschränkungen. Als letzten Aspekt sollte bei der Auswahl einer Methode die Datenqualität mit berücksichtigt werden: Die Messung muss valide mit möglichst geringen Störeinflüssen und ausreichender Frequenz erfolgen und es darf keine systematischen Datenverluste geben. Neben der Datenqualität spielt aber auch der Zugriff auf verschiedene Datenebenen eine Rolle. So sollte eine Untersuchungsmethode neben der Aufzeichnung objektiver Daten (wie z. B. Fahr- oder Beobachtungsdaten) auch die Erfassung subjektiver Daten (durch Befragung der Versuchsteilnehmer) ermöglichen.

Diese von verschiedenen Autoren genannten Merkmale können zu den beiden Aspekten „methodische Kriterien“ und „Rahmenbedingungen“ zusammengefasst werden:

Methodische Kriterien

- **Kontrollierbarkeit der Situation:** Sind die Ergebnisse eindeutig interpretierbar und können Störeinflüsse kontrolliert oder eliminiert werden?
- **Reaktivität:** Beeinflusst die Messmethode das Verhalten der Versuchspersonen?
- **Datenquantität:** Ist der Zugriff auf verschiedene Datenebenen möglich?
- **Verallgemeinerbarkeit:** Sind die Ergebnisse verallgemeinerbar?

Rahmenbedingungen

- **Ethische/rechtliche Einschränkungen:** Gibt es ethische und/oder rechtliche Einschränkungen beim Einsatz der Methode?
- **Akzeptanz durch Probanden:** Ist der Einsatz der Methode für die Versuchspersonen unangenehm oder unzumutbar?
- **Technische Umsetzungsmöglichkeiten:** Können technische Entwicklungen (z. B. Fahrerassistenzsysteme) in einem frühen Stadium untersucht werden oder ist ihre tatsächliche Funktionalität erforderlich?
- **Aufwand und Kosten:** Ist der Einsatz der Methode für die Durchführenden aufwändig und kostenintensiv?

Diese Sammlung impliziert keine Gleichgewichtung der Kriterien. Je nach Fragestellung sind die Kriterien unterschiedlich relevant. So ist beispielsweise für Untersuchungen der Nutzerakzeptanz eines Navigationssystems der Aspekt der Datenquantität weniger wichtig, da subjektive Daten zur Beantwortung der Fragestellung genügen. Im Gegensatz dazu ist bei fahrsicherheitsrelevanten Themen die Erhebung von Fahrdaten, subjektiven Daten und möglicherweise auch Blickverhaltensdaten notwendig für die Beantwortung der Fragestellung.

Neben diesen methodischen Kriterien und Rahmenbedingungen sind auch inhaltliche Kriterien für die Bewertung eines Verfahrens notwendig. Inhaltliche Kriterien sind allerdings stark von der Fragestellung der geplanten Untersuchung abhängig und werden somit in der eher allgemein gehaltenen Literatur nur wenig berücksichtigt. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Interaktionen zwischen mehreren Fahrern in einem Pulk. Diese Interaktionen wurden bisher nicht ausreichend berücksichtigt, da stattdessen das Augenmerk eher auf den Fahrer bzw. den Verkehr gelegt wurde. Ideal wäre somit eine Methode, die möglichst alle drei Ebenen des Verkehrs (Fahrer, Pulk, Verkehr) betrachten kann. Daher wird die Untersuchbarkeit jeder dieser drei Ebenen als **inhaltliches Kriterium** eingeführt:

- **Individuelles Fahrerverhalten:** Ist das Verhalten einzelner Fahrer untersuchbar?
- **Interaktionen:** Ist es möglich, soziale Interaktionen zwischen mehreren Verkehrsteilnehmern zu betrachten?
- **Verkehrliche Wirkung:** Sind Auswirkungen von Manipulationen auf das gesamte Verkehrssystem untersuchbar?

2.1.2 Studien mit realen Fahrzeugen

Studien mit realen Fahrzeugen sind nach Art der Prüfumgebung zu unterscheiden: Zum einen sind Untersuchungen im realen Verkehr verbreitet, zum anderen sind aber auch Studien auf einem Testgelände möglich.

2.1.2.1 Realverkehr

Bei Versuchen im realen Verkehr ist wiederum zwischen mehreren methodischen Varianten zu differenzieren:

- Naturalistic Driving Studies (NDSs)
- Field Operational Tests (FOTs)
- Feldexperimente

NDSs zielen darauf ab, das natürliche Fahrverhalten in gewöhnlichen Verkehrssituationen, aber auch in Konfliktsituationen und bei Unfällen zu beschreiben (Bonnard & Brusque, 2008). Hierzu werden Fahrzeuge mit Videokameras und Sensorik zur Erfassung von Fahrdaten ausgestattet und einer größeren Stichprobe an Fahrern für einen längeren Zeitraum zur Verfügung gestellt. Durch Aufzeichnung von Fahrten im alltäglichen Gebrauch (Pendeln zur Arbeit oder Fahrten in der Freizeit) werden so große Mengen an Daten gesammelt und anschließend ausgewertet. Versuchsleiter sind nicht anwesend und Instruktionen zum Fahrverhalten oder zur Routenwahl existieren nicht. Somit werden die Ergebnisse davon nicht beeinflusst und das natürliche Fahrverhalten kann tatsächlich bestimmt werden. Das wohl bekannteste Beispiel dieser Methodik stellt die „100-car study“ dar, bei der die Fahrer von 100 mit Messtechnik ausgerüsteten Fahrzeugen über ein Jahr lang beobachtet wurden (Klauer, Dingus, Neale, Sudweeks, & Ramsey, 2006).

Eine Sonderform von NDSs stellen FOTs dar, in denen die Fahrzeuge zusätzlich zur Messsensorik mit Fahrerassistenz- oder -informationssystemen ausgestattet sind. Ziel ist hier, die Nutzung und Akzeptanz dieser Systeme im längeren Gebrauch zu erfassen. Ein Beispiel hierfür ist das Projekt euroFOT, bei dem acht Assistenz- und Informationsfunktionen in mehr als 1000 ausgerüsteten Fahrzeugen untersucht wurden (M. Benmimoun, Fahrenkrog, Zlocki, & Eckstein, 2011).

Die Vorteile von NDSs und FOTs im Realverkehr liegen auf der Hand: Durch Fahrten im natürlichen Fahrumfeld bieten diese Studienformen ein hohes Maß an externer Validität. Es ist darüber hinaus möglich, sonst praktisch nicht zugängliche Ereignisse wie Unfälle oder Beinahe-Unfälle zu beobachten (Vollrath & Krems, 2011). Hierfür müssen allerdings viele Fahrer über einen längeren Zeitraum untersucht werden, was aufgrund der technischen Ausstattung sehr kostenintensiv ist. Nach Abschluss der Studie müssen die relevanten Ereignisse aus der Gesamtmasse an Daten herausgefiltert und zugehörige Informationen durch Auswertungen von Videoaufzeichnungen gewonnen werden. Diese Analysen von Fahr- und Videodaten stellen einen großen Aufwand dar.

Um Fragestellungen kompakter untersuchen zu können, wird bei Feldexperimenten die Fahrt eines Probanden auf einer vorgegebenen Strecke unter Anwesenheit eines Versuchsleiters beobachtet. Hierdurch ist möglich, durch Instruktionen gewünschtes Verhalten hervorzurufen (z. B. die Nutzung eines Fahrerinformationssystems). Allerdings wird hierdurch die Natürlichkeit des Fahrverhaltens eingeschränkt und es werden möglicherweise Verhaltensweisen provoziert, die der Fahrer außerhalb der Untersuchungssituation nicht zeigen würde (Krems, Henning, & Petzoldt, 2009). Zudem schränken rechtliche Rahmenbedingungen die Flexibilität bei Feldexperimenten ein: Fahrerassistenz- oder -informationssystemen können erst spät im Entwicklungsprozess geprüft werden, da die zugrunde liegende Technologie schon vollständig entwickelt sein muss (Breuer, 2009). Zudem ist die Untersuchung sicherheitskritischer Fragestellungen aufgrund der möglichen Gefährdung der Probanden nur bedingt durchführbar.

Allen Versuchen im Feld ist der Nachteil einer eingeschränkten Kontrollierbarkeit gemein, da externe Einflussfaktoren wie Verkehrs- oder Wetterbedingungen nicht konstant gehalten oder gezielt variiert werden können.

Interaktionen zwischen mehreren Fahrern können mit Studien im Realverkehr nur begrenzt untersucht werden: Da bei NDSs und FOTs die Routen nicht vorgegeben werden, ist ein zufälliges Aufeinandertreffen zweier Versuchsfahrzeuge (z. B. im Kreuzungsbereich) äußerst unwahrscheinlich. Bei Feldexperimenten ist der Einsatz mehrerer Fahrzeuge sehr aufwändig und es liegen nur sehr wenige solcher Studien vor. Ein Beispiel stellt eine Untersuchung dar, in der die Anforderungen beim koordinierten Kolonnenfahren betrachtet wurden (Mühlbacher, Messerschmidt, Totzke, & Krüger, 2010). Hierbei mussten jeweils drei Fahrer eine Autobahnstrecke sowohl einzeln als auch koordiniert in einer gemeinsamen Dreierkolonne befahren. In der Kolonne wurde langsamer gefahren und es wurden weniger Spurwechsel getätigt. Zudem wurde das koordinierte Fahren als anstrengender beurteilt. Von den Fahrern selbst wurden vor allem Überholen, das Halten von Abständen und das Durchfahren von Anschlussstellen als schwierige Situationen identifiziert. Weiterhin blickten die Fahrer bis zu 18 % der Fahrdauer in den Innenspiegel und richteten ihre Aufmerksamkeit damit weg von der Straße, was zu Einbußen an Fahrsicherheit führen kann. Zusätzlich kam es durch die Aufgabe der Fahrer, möglichst immer zusammenzubleiben, zu unerwartet sicherheitskritischen Situationen. Dies verdeutlicht die Limitation von Realfahrstudien aufgrund der potentiellen Gefährdung von Probanden, Versuchsleitern sowie anderen Verkehrsteilnehmern.

2.1.2.2 Testgelände

Studien auf einem Testgelände bzw. einem abgesperrten Bereich werden vor allem genutzt, um vorgegebene Fragestellungen (z. B. die Evaluation eines Fahrerassistenzsystems) in einer kontrollierten Umgebung ohne Umgebungsverkehr in einem realen Fahrzeug zu untersuchen. Von Vorteil ist hier, dass die Versuchsumgebung (z. B. Strecken und Manöver) in weiten Teilen der Fragestellung angepasst werden kann. Bei der Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen befinden sich diese meist in einem seriennahen Entwicklungsstand, jedoch sind die Fragestellungen oft sicherheitskritischer Natur, wie beispielsweise Untersuchungen von

Systemgrenzen (z. B. Mühlbacher & Totzke, 2009) oder -ausfällen (z. B. Neukum & Krüger, 2003). Hierbei werden die Reaktionen der Fahrer auf unerwartete kritische Situationen erfasst. Um einen Schaden von Probanden und Versuchsmaterialien abzuwenden, werden diese kritischen Situationen oft entschärft, beispielsweise durch den Einsatz von Schaumstoffhindernissen (Olson & Sivak, 1986), Plastikfässern (Lerner, 1993) oder Gummifahrzeugen (Eidehall, Pohl, & Gustafsson, 2005).

Nachteil dieser Prüfunggebung ist, dass hinsichtlich der Verkehrssituation nur einfache Szenarien realisierbar sind (Breuer, 2009): So muss aufgrund der Beschaffenheit von Testgeländen auf komplexe Innenstadt- und Autobahnzenarien verzichtet werden. Weiterhin ist die Höhe der gefahrenen Geschwindigkeiten stark von der Größe des Testgeländes abhängig. Falls mehrere Fahrzeuge für ein Interaktionsszenario benötigt werden, werden diese meist von Vertrauten der Versuchsleitung gesteuert. Klanner (2008) beispielsweise untersuchte den Nutzen eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug auf einem Testgelände. Hierzu fuhren Probanden auf eine Kreuzung zu und erhielten eine Warnung vor einem kreuzenden Fahrzeug, das sich von einer nicht-einsehbaren Seite der Kreuzung annäherte. Dieses Fahrzeug wurde von einem Vertrauten der Versuchsleitung gesteuert, der rechtzeitig bremste, um Kollisionen zu verhindern.

Von Untersuchungen mit mehreren Fahrzeugen, welche alle von naiven Probanden gesteuert werden, sind nur wenige Beispiele bekannt. So wurden im Forschungsprojekt *sim^{TD}* Versuche zur Evaluation kooperativer Fahrerassistenzsysteme auf einem Testgelände unter gleichzeitiger Beteiligung mehrerer Fahrer durchgeführt. Hierbei wurden bis zu 60 Fahrzeuge auf dem Gelände eingesetzt, um die gewünschten Verkehrszustände (z. B. dichten Verkehr) zu realisieren.

Im Rahmen dieser Testgeländeversuche untersuchten Mühlbacher und Roche (2013) die Wirkung eines Längsführungsassistenten (elektronisches Bremslicht), der vor starken Bremsungen vorausfahrender Fahrzeuge warnte. Die Probanden hatten die Aufgabe, in Zweier-, Dreier- oder Viererkolonnen mit einem Folgeabstand von etwa 30 m eine kurze Strecke zu befahren. Das Führungsfahrzeug der Kolonne wurde von einem Vertrauten der Versuchsleitung gesteuert, welcher zu einem vordefinierten Zeitpunkt eine Notbremsung durchführte. Das elektronische Bremslicht hatte keinen Effekt auf das Brems- und Reaktionsverhalten. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass die Fahrer während der Fahrt sehr aufmerksam waren (z. B. durch Konzentration auf das Führungsfahrzeug, um die Abstandsvorgabe von 30 m einzuhalten) und die Bremsung somit frühzeitig bemerkten. Trotzdem wurde das System in der Akzeptanzbewertung relativ positiv bewertet. Insbesondere Versuchsfahrer, die angaben, kurz vor der Bremsung des Initialfahrzeugs zufällig durch Blicke auf den Tacho oder das Radio abgelenkt gewesen zu sein, gaben nochmals signifikant positivere Bewertungen ab als die übrigen Fahrer. Somit weisen die Ergebnisse darauf hin, dass das elektronische Bremslicht insbesondere in Ablenkungsbedingungen hilfreich sein kann. Für eine Bestätigung dieser Vermutung müsste eine Folgestudie mit einer systematischen Ablenkungsbedingung durchgeführt werden. Jedoch ist dies mit realen Fahrzeugen aus rechtlicher und ethischer Sicht nicht durchführbar, da eine derartige Untersuchung für die Fahrer zu gefährlich wäre.

Eine Besonderheit in der Methodik von Testgeländeversuchen stellt die „Vehicle-in-the-loop“-Technik dar (Bock, 2009). Während der Fahrer in einem realen Versuchsfahrzeug sitzt, werden über ein „Optical see through head mounted display“ während der Fahrt virtueller Fremdverkehr und sonstige simulierte Gegenstände eingeblendet. Mittels Sensormodellen können Fahrerassistenzsysteme im Versuchsfahrzeug auf die virtuellen Fremdfahrzeuge reagieren und auf diese Weise untersucht werden. Voraussetzung hierfür ist ein ausreichend großes Testgelände. Diese Untersuchungsmethode birgt vor allem für die Entwicklung und Evaluierung von Fahrerassistenzsystemen zur Steigerung der Fahrsicherheit in sicherheitskritischen Situationen ein hohes Potential (z. B. Brems- oder Ausweichassistenz). Aufgrund der Kombination virtueller und realer Techniken stellt diese Methode nach Berg, Karl und Färber (2011, S. 1) eine „Brücke“ zwischen Realfahrten und Fahrsimulation dar.

Ein Nachteil dieser Methode ist der hohe Aufwand, da viele Parameter (z. B. Position des Fahrzeugs, Position des Kopfs des Fahrers sowie Blickrichtung) exakt erfasst werden müssen. Weiterhin zeigten sich in ersten Studien noch Probleme wie eingeschränkte Sehschärfe entfernter Objekte oder Latenzen bei der Visualisierung (Berg et al., 2011; Starke & Hänsel, 2011), welche die Qualität der Ergebnisse beeinträchtigen können.

2.1.3 Fahrsimulation

Fahrsimulatoren werden seit den 1960er Jahren verwendet, um das Verhalten von Fahrern zu untersuchen (Allen, Rosenthal, & Cook, 2011). Mittlerweile liegen Fahrsimulatoren in den verschiedensten Ausbaustufen vor: Die günstigste Variante stellen Tischsimulationen dar, in denen der Proband ein virtuelles Fahrzeug mittels eines Joysticks oder Spielelenkrads über eine auf einem Bildschirm dargestellte Szenerie steuert (siehe Abbildung 2 links). Aufwändigere Simulatoren besitzen ein Bewegungssystem – hier wird die Fahrzeugkabine meist über sechs Aktuatoren getragen und bewegt (sog. Hexapod). Dieses Bewegungssystem trägt zu einer realistischeren Darstellung von Beschleunigungsreizen bei. Bei den größten Fahrsimulatoren ist die Kabine inklusive Hexapod nochmals auf einem Schlitten verankert, der sich auf Schienen entlang der x- und y-Achse bewegt (siehe Abbildung 2 rechts). Hierdurch können hochdynamische Fahrmanöver (z. B. Spurwechsel) noch realistischer wiedergegeben werden.



Abbildung 2: Tischsimulation (links, aus Gony, Diels, Reed, Stevens, & Burnett, 2013, S. 3). Fahrsimulator mit Hexapod und Schlitten (rechts, aus Breuer, 2009, S. 58).

Unabhängig von der Ausbaustufe sind allen diesen Fahrsimulatoren folgende Elemente gemeinsam (Carsten & Jamson, 2011):

- Ein oder mehrere Bildschirme/Projektoren, um die Fahrszenarie darzustellen
- Fahrzeugsteuerung (sog. Mockup) durch Joystick, Tastatur, PC-Spielelenkrad und -pedalerie oder Bedienelemente eines realen Fahrzeugs
- Soundsystem zur Darstellung von Motorengeräuschen
- Armaturenbrett (z. B. mit Geschwindigkeitsanzeige)

Anlässlich dieses großen Spektrums an Fahrsimulatoren ist jeweils pro Studie zu überlegen, welche Variante geeignet ist. Dies ist jeweils von der Forschungsfrage abhängig. Werden beispielsweise Reaktionen auf Quer- oder Längsbeschleunigungen untersucht, ist ein Simulator mit Bewegungssystem zu empfehlen, damit der Fahrer die aktiven Verzögerungen durch das System sofort mit Hilfe seines vestibulären Systems bemerkt. Alm (1995; zitiert nach Carsten & Jamson, 2011) konnte diesbezüglich zeigen, dass Probanden in einem Fahrsimulator sicherer in Kurven fahren, wenn das Bewegungssystem aktiviert ist. Spielen dagegen Reaktionen auf Beschleunigungen eine untergeordnete Rolle, zeigen sich oft keine Unterschiede zwischen Simulatoren mit und ohne Bewegungssystem. So untersuchten Engström, Johansson und Östlund (2005) Effekte visueller und kognitiver Nebenaufgaben während einer Autobahnfahrt sowohl in einem statischen als auch einem dynamischen Simulator. Die Ergebnisse zwischen beiden Simulatoren waren konsistent. Somit wäre für derartige Fragestellungen ein statischer Simulator aufgrund der geringeren Kosten sogar zu empfehlen. Ähnliche Überlegungen sind ebenso bei anderen Merkmalen von Fahrsimulatoren (z. B. Auflösung oder Sichtfeld der Darstellung) notwendig.

Da Studien im Fahrsimulator immer in einem künstlichen Milieu durchgeführt werden, stellt sich oft die Frage nach der Validität der Ergebnisse. Hierbei sind nach Blaauw (1982) zwei Aspekte der Validität zu unterscheiden:

- Die relative Validität besagt, dass die Veränderungen durch eine Manipulation in dieselbe Richtung tendieren wie bei Fahrten in der Realität (z. B. langsames Fahren durch Einführung einer Nebenaufgabe).
- Die absolute Validität besagt, dass die Größe der Veränderung durch eine Manipulation zur Realität identisch ist (z. B. exakt 10 km/h langsamere Geschwindigkeit durch Einführung einer Nebenaufgabe).

In vielen Validierungsstudien hat sich gezeigt, dass absolute Validität im Gegensatz zur relativen Validität eher selten gegeben ist (für eine Übersicht über Validierungsstudien zwischen Fahrsimulator und Realfahrzeug und ihre Ergebnisse bezüglich absoluter und relativer Validität siehe Mullen, Charlton, Devlin und Bédard, 2011). Allerdings wird häufig argumentiert, dass absolute Validität für die Tauglichkeit eines Simulators nicht unbedingt notwendig ist – vielmehr sollte relative Validität vorhanden sein (Törnros, 1998).

Der wohl bedeutendste Vorteil an Studien in der Fahrsimulation ist, dass eine speziell an die Fragestellung gestaltete Szenerie entworfen werden kann. In der Realität vorkommende konfundierende Störgrößen (wie z. B. wechselnde Verkehrs- oder Wetterbedingungen) können somit konstant gehalten oder eliminiert werden. Hierdurch sind optimale Vergleiche zwischen verschiedenen Probanden (unabhängige Designs) oder verschiedenen Bedingungen (abhängige Designs) möglich und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge können eindeutig überprüft werden. Da die Strecken an den Untersuchungszweck angepasst werden, ist die Analyse von im realen Verkehr selten oder nur zufällig vorkommender Ereignisse (z. B. Auftreten von Einsatzfahrzeugen auf Einsatzfahrten oder Wildwechsel) möglich. Ebenso spielen rechtliche oder ethische Einschränkungen bei sicherheitskritischen Szenarien (wie z. B. unerwartete Bremsungen des Vorderfahrzeugs oder Fahren unter Alkoholeinfluss) eine eher untergeordnete Rolle.

Ökonomie wird häufig als weiterer Vorteil der Fahrsimulation genannt. In der Simulation können technische Anwendungen überprüft werden, ohne dass eine Funktionalität in der Realität vorhanden sein muss. Somit können z. B. Fahrerassistenzsysteme untersucht werden, noch bevor diese technisch realisierbar sind (Breuer, 2009).

Neben den Messgrößen des Ego-Fahrzeugs können darüber hinaus alle Parameter der jeweiligen Fahrsituation (z. B. Fahrdaten des Umgebungsverkehrs, Zustände von Lichtsignalanlagen) aufgezeichnet werden. Zusätzlich zu diesen objektiven Parametern können subjektive Daten mittels Befragungen vor, während und nach den Fahrten erhoben werden. Falls weitere Messungen wie z. B. Blickerfassung oder Physiologie notwendig sind, ist dies aufgrund der stationären Stromversorgung im Labor vergleichsweise einfach umzusetzen.

Wie oben genannt, ist fehlende absolute Validität bei einem Vorhandensein der relativen Validität nur bedingt als Nachteil von Fahrsimulationen anzunehmen. Da Versuche mit Hilfe der Fahrsimulation in einer künstlichen Umgebung durchgeführt werden, wird in diesem Zusammenhang auch das Ausmaß externer Validität diskutiert. Einschränkende Effekte wie Reaktivität sind aufgrund des Wissens um die Untersuchungssituation hierbei nicht auszuschließen. Daher werden Methoden wie Eingewöhnungsphasen oder Coverstories, welche über den wahren Zweck des Versuchs täuschen, eingesetzt, um diese Effekte abzuschwächen.

Ein weiterer die externe Validität einschränkender Faktor stellt der in Experimenten häufig vorkommende „Volunteer-Bias“ dar (Rosenthal & Rosnow, 1975). Dieser besagt, dass sich diejenigen Personen, die an psychologischen Experimenten als Proband teilnehmen, von den Personen unterscheiden, die nicht teilnehmen. Nach Vollrath und Krems (2011) existieren beispielsweise nur wenige Studien, in denen ältere, ängstliche oder weibliche Probanden im Fahrsimulator untersucht wurden. Daher seien die Ergebnisse nicht für die Gesamtpopulation an Fahrern gültig.

Ein weiteres häufig diskutiertes Problem bei Untersuchungen in Fahrsimulatoren ist das Phänomen der Kinetose bzw. Simulatorkrankheit, welche sich in Form verschiedenster Symptome (z. B. Schläfrigkeit, Schwitzen, Kopfschmerzen, Übelkeit) zeigen kann (Stoner, Fisher, & Mollenhauer, 2011). Dies kann dazu führen, dass Probanden ein der Situation unangemessenes Fahrverhalten zeigen, was zu Validitätseinschränkungen führen kann. Gegebenenfalls

müssen die Probanden den Versuch sogar komplett abbrechen. Nach Sonntag, Frieling und Stegmaier (2012) liegt diese Ausfallquote im Mittel zwischen 10 und 30 %. Mit Hilfe eines speziellen Trainings zur Übung des Simulatorfahrens (u.a. Bremsen, Lenken, Abbiegen an Kreuzungen) kann die Auftretenswahrscheinlichkeit der Simulatorkrankheit allerdings reduziert werden (Hoffmann & Buld, 2006).

In der Fahrsimulation wird regelhaft nur ein realer Fahrer untersucht. Für den Umgebungsverkehr enthält eine Fahrsimulation stattdessen eine Simulation der anderen Verkehrsteilnehmer. Diese sind mit mehr oder weniger realistischen Verhaltensmodellen ausgestattet (z. B. das psycho-physische Folgemodell nach Wiedemann, 1974; siehe Kapitel 2.1.4). Die bisher entwickelten Fahrermodelle führen vorprogrammiertes Verhalten aus und reagieren nicht oder nur eingeschränkt auf die Aktionen der realen Fahrer. Es ist somit möglich, das Verhalten der simulierten Fahrzeuge exakt vorzugeben, um reproduzierbare und kontrollierbare Verkehrssituationen zu realisieren.

Die Probanden bei Fahrsimulationsversuchen wissen um die Tatsache, dass die anderen Verkehrsteilnehmer simuliert sind. Dies beeinflusst auch die Attribution der Probanden über das Verhalten des Umgebungsverkehrs. Attribution ist insbesondere relevant für Aggression, Ärger und Stress im Straßenverkehr (Baxter, Macrae, Manstead, & Stradling, 1990; Yagil, 2001). Weiterhin wird angenommen, dass Attributionen mitentscheidend sein können für die Geschwindigkeitswahl eines Fahrers (Åberg, Larsen, Glad, & Beilinson, 1997). Das veränderte Attributionsmuster wird somit zu einer Einschränkung der externen Validität beitragen.

Zaidel (1992) nennt weitere Beispiele für die Wichtigkeit der sozialen Umgebung beim Fahren. So können andere Fahrer als Informationsquelle gesehen werden (z. B. wenn vorausfahrende Fahrzeuge abbremsten, könnte sich ein Hindernis auf der Straße befinden) oder als Referenz für eine soziale Norm (z. B. Geschwindigkeitsanpassung an den Umgebungsverkehr). Ebenso werden andere Fahrer als Vorbild zur Verhaltensimitation verwendet, ähnlich wie dies von Lefkowitz, Blake und Mouton (1955) für Fußgänger gezeigt wurde: So überqueren Fußgänger häufiger rote Ampeln, wenn andere Passanten dies zuvor getan haben. Es ist fraglich, ob all diese Phänomene auch bei simulierten Modellen in der Fahrsimulation auftreten.

Da in der Fahrsimulation nur ein realer Fahrer untersucht wird, sind soziale Interaktionen mit anderen (wie z. B. Rückkopplungsprozesse oder Kommunikationen) nicht darstellbar bzw. untersuchbar. Allerdings sind nach Jürgensohn (1997) insbesondere Kommunikationen wichtig für die realistische Abbildung von Verkehr. Er zählt zu diesen neben Blickkontakten oder Blinken auch kleine Richtungswechsel, das Andeuten von Richtungswechsel oder das Verlangsamten der Fahrt. In ähnlicher Weise schätzen Chaloupka-Risser, Risser und Zuzan (2011) Kommunikation als einen sehr wichtigen Faktor im Straßenverkehr ein.

Weiterhin ist die Möglichkeit zur Interaktion mit anderen Agenten in einer virtuellen Welt ein wichtiger Faktor zum Entstehen von Presence (d. h. das Empfinden, sich in einer virtuellen Umgebung tatsächlich anwesend zu fühlen), wie Schubert, Friedmann und Regenbrecht (2001) zeigen konnten. Somit ist wahrscheinlich, dass sich das Fehlen von Interaktionsmöglichkeiten negativ auf das Realitätsempfinden der Probanden in der Fahrsimulation auswirkt.

2.1.4 Verkehrssimulation

Die Verkehrssimulation untersucht Fragestellungen des gesamten Verkehrssystems in einer kontrollierten Umgebung und verwendet hierbei ausschließlich Verkehrs- bzw. Fahrermodelle. Reale Fahrer werden in der Verkehrssimulation dagegen nicht eingesetzt. Sie ist in zwei Varianten einzuteilen (Treiber & Kesting, 2010):

Die makroskopische Verkehrssimulation betrachtet Verkehrsströme, ohne diese in einzelne Fahrzeuge zu unterteilen und nutzt ausschließlich lokal (zu einem Querschnitt) aggregierte Größen wie z. B. Verkehrsdichte, mittlere Geschwindigkeit oder Varianz der Geschwindigkeit, die räumlich und zeitlich variabel sind. Sie ist somit geeignet, Staus und ähnliche Störungen im Verkehrsfluss zu beschreiben.

Ist man dagegen an detaillierteren Aussagen über den Verkehrsablauf interessiert, ist die mikroskopische Verkehrssimulation das adäquatere Mittel. Sie untersucht Verkehrsflüsse unter Berücksichtigung von Einzelfahrzeugen und betrachtet die Reaktionen aller Fahrer (Beschleunigen, Bremsen, Spur wechseln) in Abhängigkeit des Umgebungsverkehrs. Somit können verschiedene Fragestellungen untersucht werden (sim^{TD}, 2010; Trapp, 2006; Treiber & Kesting, 2010), wie z. B.

- Beeinflussung des Verkehrsflusses durch einzelne Fahrzeuge (z. B. Fahrzeuge ausgestattet mit Abstandsregeltempomaten oder kooperativen Assistenzsystemen)
- Verkehrliche Wirkung eines Assistenzsystems für unterschiedliche Ausstattungsraten in sonst identischen Situationen und Verkehrszuständen
- Auswirkungen baulicher oder infrastruktureller Maßnahmen (z. B. Tempolimit, LKW-Überholverbot)
- Einfluss verschiedener Fahrstile auf die Verkehrsstabilität
- Entstehung und Entwicklung von Stauungen

Als Ergebnis der Verkehrssimulationsstudien können verschiedenste verkehrliche Kenngrößen für das gesamte Fahrzeugkollektiv (z. B. Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, Wartezeiten, Staulängen, Emissionen) ermittelt werden. Diese Fragestellungen der Verkehrssimulation dienen in den meisten Fällen einer Betrachtung von effizientem und ökonomischem Fahren. Untersuchungen der Fahrsicherheit sind eher selten, da die Modelle der Verkehrssimulation das normale Fahrverhalten beschreiben und Fehler der Fahrer, wie z. B. in der Wahrnehmung oder Entscheidung, nicht berücksichtigen (Archer & Kosonen, 2000). Somit sind in den meisten Modellen der Verkehrssimulation Verkehrsunfälle gar nicht möglich.

Die mikroskopische Verkehrssimulation besteht aus einem Simulationsmodell, das sich wiederum aus einzelnen Teilmodellen zusammensetzt (Trapp, 2006). Während das Netzmodell das Streckennetz samt Infrastruktur (z. B. Lichtsignalanlagen mit Regelalgorithmen) abbildet, stellen die Verhaltensmodelle das Verhalten einzelner sogenannter „Fahrer-Fahrzeug-Einheiten“ nach:

- Fahrzeugfolgmodell: Legt das Abstandsverhalten aufeinanderfolgender Fahrzeuge fest.
- Fahrstreifenwechselmodell: Bestimmt die Regeln, nach denen Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden.
- Routenwahlmodell: Definiert den Fahrtverlauf eines Fahrzeugs durch das Streckennetz.

Es werden verschiedene Modelle mit den unterschiedlichsten Abstraktionsgraden verwendet. Einfachere Modelle verwenden einfache Regeln zur Weiterbewegung der Fahrzeuge, während komplexere Modelle mehrere Eingangsvariablen mit berücksichtigen. Das Intelligent Driver Model (Treiber, Hennecke, & Helbing, 2000) beispielsweise berücksichtigt die Eingangsgrößen Ego-geschwindigkeit, Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs sowie den Abstand zum Vorderfahrzeug und verwendet intelligente Bremsstrategien. Erweiterungen dieser Modelle berücksichtigen darüber hinaus auch menschliche Eigenschaften (z. B. Reaktionszeiten, Fehler bei der Geschwindigkeitsschätzung, Fahrfehler, Antizipation).

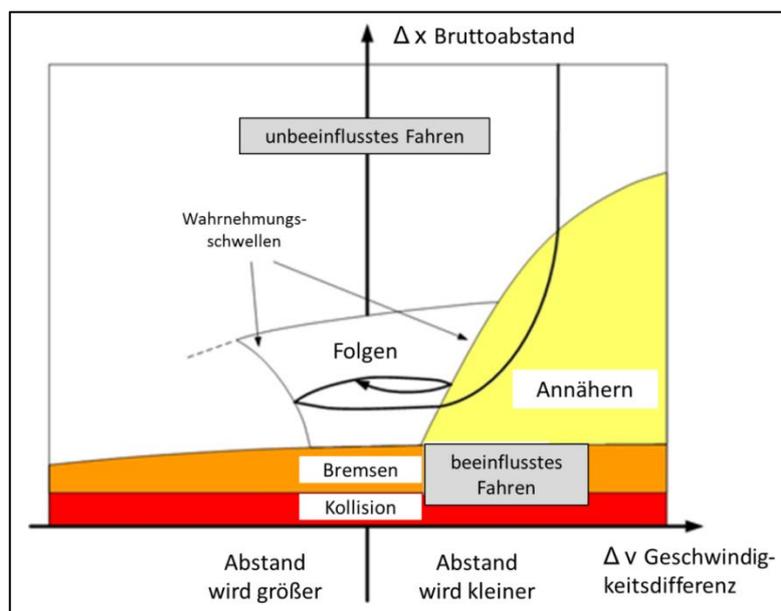


Abbildung 3: Zustände des Fahrens, modifiziert nach Wiedemann (1974).

Eines der bekanntesten Modelle ist das psycho-physische Folgemodell nach Wiedemann (1974), in dem das Verhalten über die Wahrnehmung der Situation bestimmt wird. Es unterscheidet grundsätzlich zwischen unbeeinflusstem (freies Fahren ohne Interaktion mit anderen Fahrzeugen) und beeinflusstem Fahren (Interaktion mit anderen Fahrzeugen). Das beeinflusste Fahren wird wiederum in Annähern, Folgen und Bremsen differenziert (siehe Abbildung 3):

- Im freien Fahren gibt es keine Störungen durch andere Fahrzeuge oder Umwelteinflüsse und der Fahrer versucht, seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Nach Erreichung pendelt der Fahrer um diese Zielgeschwindigkeit.

- Im Annähern schließt der Fahrer zu einem langsameren Fahrzeug auf und verringert seine Geschwindigkeit. Der gewählte Abstand (sog. Wunschabstand) hängt vom Sicherheitsbedürfnis des Fahrers ab.
- Wird der akzeptierte Minimalabstand unterschritten, muss der Fahrer bremsen.
- Ist der Wunschabstand eingestellt, folgt der Fahrer dem Vorderfahrzeug. Auch hierbei pendelt der Abstand um diesen Wert.

Als Besonderheit dieses Modells fließen mehrere fahrerindividuelle Parameter wie Schätzvermögen, Motivationsfaktor und Sicherheitsbedürfnis mit ein. Interindividuelle Unterschiede werden durch normalverteilte Zufallsgrößen berücksichtigt. Da dieses Modell Grenzen besitzt (z. B. nur für Autobahnen entwickelt wurde), existieren auch Überarbeitungen wie z. B. PELOPS (Hochstädter, Ehmanns, & Neunzig, 1999). Allerdings liegt laut Jürgensohn (1997) das Hauptaugenmerk der Verkehrssimulationsforschung vermehrt in der Entwicklung komplexer Verkehrsszenarien oder der Ausweitung der simulierbaren Straßentypen oder Verkehrssituationen anstelle der Weiterentwicklung der Fahrermodelle.

Somit wird immer wieder diskutiert, dass die Modelle der Verkehrssimulation einer realistischen Simulation menschlichen Verhaltens im Verkehr nicht gerecht werden, da dieses zu sehr variabel, flexibel und durch interindividuelle Unterschiede gekennzeichnet ist (z. B. Krajzewicz & Wagner, 2004; Willumeit & Jürgensohn, 1997). Für eine realistische Darstellung des Verkehrsflusses sind wesentlich komplexere Modelle notwendig und es besteht ein erheblicher Forschungsbedarf an deren Entwicklung. Insbesondere Spurwechsel und soziale Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern werden häufig als unzureichend eingeschätzt. Trotzdem werden die Modelle der Verkehrssimulation verwendet, getreu Box und Draper (1987, S. 424): „Essentially, all models are wrong, but some are useful“. Für welches Modell mit welchem Komplexitätsgrad sich letztendlich entschieden wird, hängt von der Fragestellung und den Untersuchungszielen ab. Zusätzlich ist stets zu bedenken, dass mit einem zunehmenden Detaillierungsgrad des Modells der Rechenaufwand zunimmt.

Da das Ergebnis in der Verkehrssimulation stark abhängig von den zugrundeliegenden Parametern des Modells ist, muss dieses für jede Untersuchung kalibriert und anschließend validiert werden. Hierzu müssen die Parametrisierungen an einem empirischen Datensatz aus dem Realverkehr oder der Fahrsimulation geprüft werden und die berechneten Kenngrößen innerhalb eines zuvor festgelegten Fehlermaßes bleiben. Liegen keine empirischen Daten vor, kann eventuell auf Daten aus vergleichbaren Situationen zurückgegriffen werden – allerdings muss dann auf eine eingeschränkte Aussagekraft der Studie hingewiesen werden. Liegen zu einem Szenario weder empirische Daten noch vergleichbare Situationen für Kalibrierung und Validierung vor, sind hierzu keine Studien in der Verkehrssimulation möglich (sim^{TD}, 2010; Trapp, 2006).

2.1.5 Vergleich der Methoden

Im Folgenden sollen die drei Untersuchungsmethoden „Studien mit realen Fahrzeugen“, „Fahrsimulation“ und „Verkehrssimulation“ hinsichtlich der in Kapitel 2.1.1 herausgearbeiteten Kriterien verglichen werden. Hierbei erfolgt eine Bewertung in positiv (+), neutral (o) und negativ (–) bzw. nicht vorhanden (n/a):

Methodische Kriterien

- **Kontrollierbarkeit der Situation:** Sind die Ergebnisse eindeutig interpretierbar und können Störeinflüsse kontrolliert oder eliminiert werden?
Im realen Verkehr bzw. auf einem Testgelände können die Untersuchungssituationen nur eingeschränkt kontrolliert werden (o), wohingegen in der Fahr- und Verkehrssimulation die Rahmenbedingungen sehr gut konstant gehalten werden können (+).
- **Reaktivität:** Beeinflusst die Messmethode das Verhalten der Versuchspersonen?
In Studien mit realen Fahrzeugen ist das Ausmaß der Reaktivität je nach Wissen der Versuchspersonen mittel bis gering (o). In der Fahrsimulation ist aufgrund der vergleichsweise unnatürlicheren Situation mit einem höheren Maß an Reaktivität zu rechnen (–). Da in der Verkehrssimulation keine realen Fahrer involviert sind, ist dieser Aspekt hier nicht relevant (n/a).
- **Datenquantität:** Ist der Zugriff auf verschiedene Datenebenen möglich?
Im realen Verkehr können viele Daten nicht oder nur mit großem Aufwand (z. B. Fahrdaten des Umgebungsverkehrs) erhoben werden (o). In der Fahr- und Verkehrssimulation ist eine Aufzeichnung nahezu aller Parameter möglich. Darüber hinaus erlaubt die Fahrsimulation die Erfassung subjektiver Maße durch Befragung der Versuchspersonen (+), was in der Verkehrssimulation nicht möglich ist (o).
- **Verallgemeinerbarkeit:** Sind die Ergebnisse verallgemeinerbar?
Da Studien im realen Verkehr unter realistischen Bedingungen erfolgen, sind die Ergebnisse generalisierbar (+). Bei Studien in der Fahr- und Verkehrssimulation ist die Verallgemeinerbarkeit dagegen aufgrund der Laborsituation jeweils geringer, allerdings belegen mehrere Validierungsstudien die Gültigkeit der Ergebnisse (o). Bei der Fahrsimulation ist jedoch von Vorteil, dass zumindest ein realer Fahrer involviert ist, während in der Verkehrssimulation ausschließlich Verhaltensmodelle agieren.

Rahmenbedingungen

- **Ethische/rechtliche Einschränkungen:** Gibt es ethische und/oder rechtliche Einschränkungen beim Einsatz der Methode?
Im realen Verkehr sind sicherheitskritische Untersuchungen aufgrund ihrer Gefährlichkeit nicht oder nur äußerst eingeschränkt untersuchbar (–). In der Fahrsimulation dagegen ist die Bearbeitung dieser Fragestellungen möglich (+). Da in der

Verkehrssimulation keine realen Fahrer eingesetzt werden, müssen ethische und rechtliche Rahmenbedingungen nicht berücksichtigt werden (+).

- **Akzeptanz durch Probanden:** Ist der Einsatz der Methode für die Versuchspersonen unangenehm oder unzumutbar?

Da Studien mit realen Fahrzeugen oft sehr alltagsnah sind, ist die Teilnahmebereitschaft der Probanden recht hoch (+). In der Fahrsimulation ist dagegen mit dem Auftreten von Simulatorübelkeit zu rechnen, wodurch die Teilnahme von hierfür anfälligen Versuchspersonen nicht möglich ist (o). Da in der Verkehrssimulation keine realen Fahrer involviert sind, ist dieser Aspekt hier nicht relevant (n/a).

- **Technische Umsetzungsmöglichkeiten:** Können technische Entwicklungen (z. B. Fahrerassistenzsysteme) in einem frühen Stadium untersucht werden oder ist ihre tatsächliche Funktionalität erforderlich?

Im realen Verkehr müssen technische Entwicklungen in einem fortgeschrittenen Stadium sein, um untersucht werden zu können (-). Dagegen können in der Fahr- und Verkehrssimulation technische Systeme untersucht werden, die unter realen Bedingungen noch nicht umsetzbar sind (+).

- **Aufwand und Kosten:** Ist der Einsatz der Methode für die Durchführenden aufwändig und kostenintensiv?

Aufgrund der notwendigen Einrichtung der Fahrdatenaufzeichnung und der Identifizierung relevanter Situationen ist eine Durchführung von Studien im realen Verkehr sehr aufwändig (-). Bei der Verwendung von Fahr- oder Verkehrssimulationen ist der Aufwand stark von der Fragestellung und Versuchsplanung abhängig, welche die Implementierung eines Assistenzsystems oder den Entwurf eines aufwändigen Streckennetzes erfordern können (o).

Inhaltliche Kriterien

- **Individuelles Fahrerverhalten:** Ist das Verhalten einzelner Fahrer untersuchbar?

Da die Versuchsfahrzeuge im Realverkehr mit Messtechnik ausgestattet sind, sind detaillierte Aussagen über den einzelnen Fahrer möglich (+). Im Fahrsimulator gelingt dies vergleichbar gut (+). In der Verkehrssimulation können Verläufe einzelner Fahrzeuge betrachtet werden, jedoch sind die Ergebnisse weniger detailliert als in den anderen Versuchsumgebungen (o).

- **Interaktionen:** Ist es möglich, soziale Interaktionen zwischen mehreren Verkehrsteilnehmern zu betrachten?

Im Realverkehr sind Studien zur Beantwortung dieser Fragestellung nur unter äußerst großem Aufwand möglich (o). Da in der Fahrsimulation nur ein Fahrer beteiligt ist, sind Aussagen zu Interaktionen nicht möglich (-). In der Verkehrssimulation sind Aussagen hierzu ebenfalls nicht möglich, da lediglich Verhaltensmodelle agieren und keine realen Fahrer (-).

- **Verkehrliche Wirkung:** Sind Auswirkungen von Manipulationen auf das gesamte Verkehrssystem untersuchbar?

Im realen Verkehr sind Studien zur Beantwortung dieser Fragestellung nur unter äußerst großem Aufwand möglich, da eine hohe Anzahl an Fahrzeugen mit Messtechnik ausgestattet werden muss (o). In der Fahrsimulation ist neben den simulierten Modellen nur ein realer Fahrer beteiligt, was Aussagen auf den Gesamtverkehr nicht möglich macht. Jedoch können die Daten mehrerer Probanden aggregiert werden und somit Abschätzungen auf den gesamten Verkehrsfluss getätigt werden (o). Im Gegensatz dazu ist die Verkehrssimulation ist für diese verkehrlichen Fragestellungen sehr gut geeignet (+).

Der Vergleich der drei Methoden wird in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Bewertung der Versuchsmethoden „Studien mit realen Fahrzeugen“, „Fahrsimulation“ und „Verkehrssimulation“ anhand der in Kapitel 2.1.1 definierten Kriterien in positiv (+), neutral (o) und negativ (-) bzw. nicht vorhanden (n/a).

		Studien mit realen Fahrzeugen	Fahrsimulation	Verkehrssimulation
Methodische Kriterien	Kontrollierbarkeit der Situation	o	+	+
	Reaktivität	o	-	n/a
	Datenquantität	o	+	o
	Verallgemeinerbarkeit	+	o	o
Rahmenbedingungen	Ethische/rechtl. Einschränkungen	-	+	+
	Akzeptanz durch Probanden	+	o	n/a
	Techn. Umsetzungsmöglichkeiten	-	+	+
	Aufwand und Kosten	-	o	o
Inhaltliche Kriterien	Individuelles Fahrerverhalten	+	+	o
	Interaktionen	o	-	-
	Verkehrliche Wirkung	o	o	+

2.2 Die Pulksimulation

Kapitel 2.1.5 zeigt, dass jede der drei Untersuchungsmethoden Vor- und Nachteile besitzt. Während Studien mit realen Fahrzeugen vor allem durch ihre Realitätsnähe profitieren, liegen die Nachteile hier in den Rahmenbedingungen, welche die Durchführbarkeit erschweren (Aufwand, Kosten, ethische Einschränkungen sowie eingeschränkte Kontrollierbarkeit). Laborstudien in Fahr- und Verkehrssimulation sind dagegen aufgrund der guten Kontrollierbarkeit für intern valide Studien geeignet. In Probandenstudien im Feld und der Fahrsimulation kann das Fahrerverhalten sehr gut analysiert werden. Die Verkehrssimulation bietet sich dagegen für verkehrliche Untersuchungen an – allerdings mit der Einschränkung, nur Verhaltensmodelle und keine echten Fahrer einzusetzen. Bezüglich der in Kapitel 1 aufgeworfenen Frage nach der Untersuchung mehrerer Fahrer zur Betrachtung sozialer Interaktionen ist keine der drei Methoden optimal.

Somit besteht eine Lücke im Spektrum der vorhandenen Methoden. Gesucht ist eine Methode mit günstigen Rahmenbedingungen, ausreichender Realitätsnähe und der Interaktionsmöglichkeit mehrerer realer Fahrer. Dies entspricht dem Gedanken der Pulksimulation, welche eine Fahrsimulation darstellt, die aus miteinander vernetzten Fahrstationen besteht. Diese neue Methode hat das Potential, die verschiedenen Vorteile der einzelnen bisherigen Untersuchungsmethoden zu vereinen.

2.2.1 Bisherige Studien in vernetzten Fahrsimulationen

Um das gleichzeitige Verhalten zweier realer Fahrer zu erfassen, wurden erstmals im Jahr 2003 zwei Fahrsimulatoren an der University of Minnesota vernetzt. Mit diesem Aufbau untersuchten Hancock und de Ridder (2003) das Reaktionsmuster von Fahrern in Beinahe-Kollisionen. Jedes der beiden Simulatorfahrzeuge wurde von einem Probanden in zwei Szenarien gesteuert. Das erste Szenario bestand aus einer Kreuzung, welche durch einen Sichtschutz nicht einsehbar war. Im zweiten Szenario fuhren die beiden Probanden auf der mittleren Spur eines dreispurigen Highways aufeinander zu – auch hier sahen sich die Fahrer nicht aufgrund einer Kuppe zwischen den Anfahrten. Das Aufeinandertreffen im Kreuzungsbereich und auf der Kuppenanhöhe wurde durch gleichzeitiges Losfahren an Ampeln und der Vorgabe von Richtgeschwindigkeiten ermöglicht. Allerdings konnten laut den Autoren keine Interaktionen zwischen den Fahrern betrachtet werden, da sie sich meist zu spät sahen, um aufeinander reagieren zu können.

Houtenbos (2008) verwendete ebenfalls eine vernetzte Fahrsimulation, um das Fahrverhalten an Kreuzungen zu untersuchen. Ein Proband befuhr hierzu in zwei Durchgängen einen Parcours mit mehreren Rechts-vor-Links-geregelten Kreuzungen. An einigen dieser Kreuzungen wurde durch ein zweites Fahrzeug Querverkehr realisiert. Dieses Fahrzeug wurde etwa 30 m vor der Kreuzung sichtbar und gewährte entweder Vorfahrt oder nahm die Vorfahrt. Während das querende Fahrzeug in einem Durchgang simuliert war und vorprogrammiertes Verhalten zeigte, wurde es in dem anderen Durchgang ohne Wissen des Probanden vom

Versuchsleiter gesteuert. Der Versuchsleiter war instruiert, sich bezüglich Geschwindigkeit und Bremsen möglichst kontrolliert zu verhalten. Allerdings berücksichtigte er das Annäherungsverhalten des Probanden, um die Wahrscheinlichkeit für ein gleichzeitiges Aufeinandertreffen an der Kreuzung zu erhöhen. Hierdurch zeigte das querende Fahrzeug im Vergleich zu den simulierten Fahrzeugen eine höhere Variation im Annäherungsverhalten, was wiederum im Verhalten des Probanden zu einer höheren Verhaltensvariation führte. Zusätzlich ereigneten sich mehr sicherheitskritische Situationen mit dem humangesteuerten Querverkehr, da der simulierte Querverkehr die Kreuzung teilweise zu früh oder zu spät erreichte, was die Situationen entschärfte.

In einem zweiten Experiment mit der vernetzten Fahrsimulation wurden von Houtenbos (2008) dieselben Verkehrsszenarien wie im ersten Experiment untersucht. Allerdings wurde diesmal der Querverkehr ausschließlich von einem Versuchsleiter realisiert. Ein Teil der Situationen war instruiert, d. h. der Versuchsleiter sollte sich in den Szenarien wie im ersten Experiment verhalten. Daneben gab es Abschnitte, in denen er sich „wie in der Realität“ der Kreuzung annähern sollte und hierbei nicht wusste, ob der Proband von der linken (hier hat der Versuchsleiter Vorfahrt) oder von der rechten Seite (hier muss der Versuchsleiter Vorfahrt gewähren) kam. Es zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Situationen, in denen der Versuchsleiter frei oder instruiert fahren musste. Laut Autorin spricht dieses Ergebnis dafür, dass das instruierte Verhalten als realistisch betrachtet werden kann und Studien mit zwei Probanden (anstelle eines Probanden und eines Vertrauten) keine anderen Erkenntnisse bezüglich des Interaktionsverhaltens an Kreuzungen hervorbringen würden.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelte mit der MoSAIC-Fahrsimulation (Modular Scalable Applications Platform for ITS Components) ebenfalls eine vernetzte Fahrsimulation. In einer ersten Studie mit dieser Simulation wurde kooperatives Fahrverhalten beim Spurwechsel untersucht (Heesen, Baumann, Kelsch, Nause, & Friedrich, 2012). Hierzu fuhren ein Vertrauter der Versuchsleitung und ein Proband an zwei Fahrstationen.

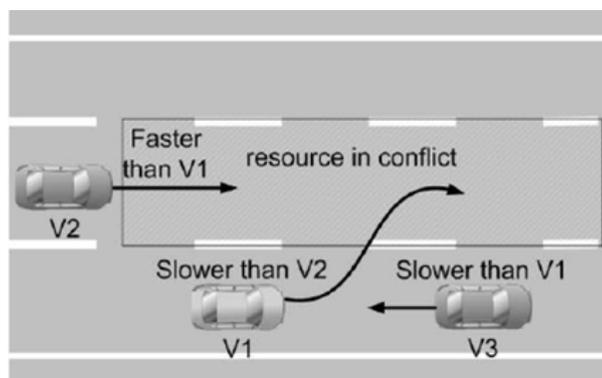


Abbildung 4: Versuchsszenario in der Studie von Heesen et al. (2012), S. 2.

In dem Untersuchungsszenario näherte sich einer der beiden Fahrer im Fahrzeug V1 einem langsameren simulierten Fahrzeug V3 auf der rechten Spur einer dreispurigen Autobahn an. Währenddessen näherte sich auf der mittleren Spur der schneller fahrende andere reale Fahrer

V2 (siehe Abbildung 4). Zu einem vordefinierten Zeitpunkt bremste das simulierte Führungsfahrzeug V3 stark ab, sodass der folgende Fahrer V1 auf die mittlere Spur wechseln oder abbremsen musste. Hierbei wurden Stärke der Bremsung, Anzeigen der Spurwechselabsicht und die Möglichkeit eines Ausweichens für das folgende Fahrzeug V2 variiert. Das Manöver wurde mehrfach mit Perspektivenwechsel durchgeführt, sodass sowohl der Vertraute als auch der Proband beide Perspektiven V1 und V2 erlebten. Erfasst wurde, ob der Proband in Position V1 hinter V3 abbremste (Kooperation) oder die Spur wechselte und damit V2 ausbremste (keine Kooperation). Fuhr der Proband das Fahrzeug V2, galt ein Spurwechsel auf die linke Fahrbahn als kooperatives Verhalten bzw. kein Spurwechsel als nicht kooperatives Verhalten.

Es zeigte sich, dass V1 in seinem Verhalten die Möglichkeit des Ausweichens für V2 in Betracht zog: Gab es eine Möglichkeit für V2, die Spur zu wechseln und V1 somit Platz zu machen, wurde selbst häufiger die Spur vor V2 gewechselt. Aus der anderen Perspektive V2 wurde häufiger kooperiert und die Spur gewechselt, wenn die Bremsung des simulierten Fahrzeugs V3 stark ausfiel. Das Anzeigen der Spurwechselabsicht durch V2 hatte dagegen keinen Einfluss auf die Kooperationsbereitschaft.

In einer zweiten Studie in der MoSAIC-Fahrsimulation untersuchten Friedrich et al. (2013) die Frage, ob der Glaube an die Realität des Umgebungsverkehrs das kooperative Fahrverhalten beeinflusst. Hierzu wurde dasselbe Szenario wie bei Heesen et al. (2012) verwendet und beide Fahrzeuge wurden ebenfalls von einem Vertrauten und einem Probanden gesteuert. Jedoch wurde in der Hälfte der Fälle die Wizard-of-Oz Technik verwendet: Das Fahrzeug wurde von einem Vertrauten gesteuert, die Probanden glaubten aber, es sei simuliert (Computer-Bedingung). In der anderen Hälfte der Fälle wussten die Probanden vom anderen menschlichen Fahrer (Human-Bedingung).

Das Wissen um die humane Steuerung des anderen Fahrzeugs hatte einen Einfluss auf das Fahren und Erleben: Nur in der Human-Bedingung wurde die Lichthupe verwendet. Während die Probanden der Human-Bedingungen eher kooperative Intentionen (z. B. „Ich wollte dem ankommenden Fahrzeug die Durchfahrt erleichtern“) schilderten, gaben die Fahrer der Computer-Bedingung eher egoistische Intentionen an (z. B. „Ich wollte unbedingt vor dem ankommenden Fahrzeug überholen“).

Eine Vernetzung von vier Fahrsimulatoren wird erstmals in der Studie von Yasar, Berbers und Preuveneers (2008) berichtet. Fragestellung war, inwiefern ein sprachbasiertes Informationssystem das Fahrverhalten an Kreuzungen und die Häufigkeit von kritischen Situationen verringert. Vier reale Fahrer sowie acht autonome Fahrzeuge mit Verhaltensmodellen befuhren ein Areal mit zwei Kreuzungen. Eine Zusatzaufgabe sollte die Fahrer dazu motivieren, alle Stellen des Parcours zu erkunden und die Kreuzungen zu passieren: Sie mussten in der Szene verstreute Wörter lesen und diese zu einem Satz zusammenfügen. Die berechneten Kenngrößen waren Post Encroachment Time sowie Geschwindigkeit und Längsbeschleunigung fünf Meter vor Kreuzungsbeginn. Es werden allerdings keine Parameter oder Auswertungen berichtet, die Interaktionen zwischen den Fahrern abbilden.

Maag (2013) verwendete ebenfalls vier vernetzte Fahrstationen, um verschiedene Aspekte des Fahrens zu untersuchen. Hier konnte gezeigt werden, dass reale Fahrer auf bremsende simulierte Fahrzeuge auf der Nachbarfahrspur mit einem Verlassen des Gaspedals reagieren. Weiterhin fanden sich beim Fahren in einer Viererkolonne Unterschiede im Geschwindigkeitsverhalten zwischen den Positionen: Fahrer am hinteren Ende des Pulks benötigten höhere Geschwindigkeitsvariationen als die vorderen Fahrer, um den Anschluss an die Kolonne nicht zu verlieren.

Zusätzlich untersuchte Maag (2013) einen Einfädelassistenten. Dieses System zeigte den auf der Autobahn befindlichen Fahrern sowie dem von der Auffahrt einfädelnden Fahrer an, welche Lücke zum Einfädeln optimal wäre. Realisiert wurde diese Situation mit drei Probanden, die auf der rechten Spur einer Autobahn folgten, und einem Probanden auf der Einfädelspur. In einigen Situationen wurden die Fahrer vom Einfädelassistenten unterstützt und in den anderen nicht. Das System führte dazu, dass der einfädelnde Fahrer weniger Ärger über die Fahrsituation empfand. Bei den sich schon auf der Autobahn befindlichen Fahrern zeigte sich kein Effekt, jedoch war hier der Ärger schon in der Bedingung ohne System sehr gering. Für die Fahrsicherheit fanden sich keine Vorteile im assistierten Fahren.

Zusammenfassend wurden vernetzte Fahrsimulatoren bisher von verschiedenen Forschergruppen eingesetzt. In den meisten Fällen wurden inhaltliche Fragestellungen zu den Themen Fahrsicherheit und kooperatives Fahren untersucht. In einigen Studien fuhr ein Vertrauter bzw. der Versuchsleiter selbst an einer Fahrstation mit. Dies hatte den Vorteil, dass das Fahrverhalten an das Fahren des Probanden angepasst werden konnte, wie die Studie von Houtenbos (2008) zeigt: Durch den Versuchsleiter konnten mehr sicherheitskritische Situationen provoziert werden als mit simuliertem Verkehr. Weiterhin konnte durch den Versuchsleiter relativ standardisiertes Fahrverhalten gezeigt werden (ähnlich einem simulierten Fahrermodell) und zusätzlich blieb das Wissen der Probanden, dass der andere Fahrer real war, bestehen. Friedrich et al. (2013) konnten demonstrieren, wie viel dieses Wissen ausmacht. Neben diesen Untersuchungsansätzen mit einem Probanden wurden auch Versuche mit mehreren Probanden gleichzeitig durchgeführt. Bei Hancock und de Ridder (2003) war diese Methode zur Untersuchung der Interaktion zweier Fahrer in sicherheitskritischen Situationen jedoch nicht geeignet. Yasar et al. (2008) setzten erstmals vier Fahrer ein, berichten allerdings keine Ergebnisse zu Interaktionen. Maag (2013) untersuchte Emotionen und kooperatives Fahren ebenfalls mit vier Probanden gleichzeitig, betrachtete jedoch nicht explizit die Interaktionen zwischen Fahrern.

Somit gibt es erste Untersuchungsansätze mit vernetzten Fahrsimulatoren, die vor allem diverse inhaltliche Fragestellungen behandelten. Jedoch fehlen Studien, welche die Methodik dieses neuen Verfahrens systematisch betrachten und die Möglichkeiten und Grenzen einer vernetzten Fahrsimulation aufzeigen.

2.2.2 Vergleich zu den bestehenden Untersuchungsmethoden

Da die Pulksimulation eine Vernetzung mehrerer separater Fahrsimulatoren darstellt, beinhaltet sie auch nahezu alle Vorzüge der Einzelfahrsimulation. Hierzu zählen die Möglichkeit zur Untersuchung sicherheitskritischer Fragestellungen, die Einfachheit technischer Umsetzungsmöglichkeiten sowie der Zugriff auf eine große Menge an objektiven und subjektiven Daten. Weiterhin ist wie in der Einzelfahrsimulation eine gewisse Kontrollierbarkeit der Situationen gegeben, da z. B. verkehrliche Rahmenbedingungen oder Wettereinflüsse konstant gehalten werden können. Allerdings ist einzuschränken, dass durch das Vorhandensein von mehreren realen Fahrern (die variabel agieren und nicht vorprogrammiert sind wie simulierte Modelle) ein Teil der Kontrollierbarkeit verloren geht. Somit ist die Kontrollierbarkeit in der vernetzten Fahrsimulation geringer im Vergleich zur Einzelfahrsimulation, aber höher als in Studien mit realen Fahrzeugen.

Da in der Pulksimulation mehrere reale Fahrer beteiligt sind, können erstmals in einer Simulation echte soziale Interaktionen im Straßenverkehr betrachtet werden. Darüber hinaus sind bei einer ausreichenden Anzahl von Fahrstationen auch Studien zu verkehrlichen Wirkungen möglich. Dies war bisher ein Schwerpunkt der Verkehrssimulation.

Der umgebende Verkehr in der Pulksimulation wird – zumindest zum Teil – durch reale Fahrer und nicht mit Hilfe simulierter Modelle gebildet. Daher verfügt die Pulksimulation über eine höhere externe Validität als die Einzelfahrsimulation. Wie bedeutsam die Tatsache ist, dass der Proband von realem oder programmiertem Verkehr umgeben ist, konnten Friedrich et al. (2013) zeigen (siehe Kapitel 2.2.1). Weitere Studien zum Vergleich humaner bzw. computergesteuerter Agenten sind für die Fahrsimulation nicht bekannt. In anderen virtuellen Realitäten dagegen wurde diese Frage bereits mehrfach untersucht:

- In einer Studie von Nowak und Biocca (2003) interagierten die Probanden in einem 15-minütigen Dialog mit einem via Bildschirm gezeigten Avatar. Der Avatar war immer computergesteuert, jedoch wurde der Hälfte der Probanden suggeriert, es sei ein anderer Proband. Ziel der Konversation sollte sein, sich für eine bevorstehende gemeinsame Aufgabe kennenzulernen. Es zeigte sich kein Effekt des vermeintlichen menschlichen Gesprächspartners bezüglich Presence.
- Verschiedene Studien verglichen das Erleben bei Computer- und Konsolenspielen gegen reale Menschen mit dem Spielen gegen computergesteuerte Gegner. Menschliche Gegenspieler erzeugen bei den Probanden ein stärkeres Empfinden von Presence, Flow, Spaß, höherer Emotionalität und physiologischer Erregung (Ravaja et al., 2006; Weibel, Wissmath, Habegger, Steiner, & Groner, 2008). Williams und Clippinger (2002) berichten zudem von geringerer Aggression nach einem Spiel mit realen Gegnern, verglichen mit Computergegnern.
- Löw (2013) untersuchte das Verhalten von Probanden, die in einer über ein Head-Mounted Display präsentierten virtuellen Realität Beifahrer in einem PKW waren. Der Fahrer war immer computergesteuert, allerdings wurde der Hälfte der Probanden

mitgeteilt, es sei ein anderer Proband. In einem Gefahrenszenario (Tunnel mit Rauchentwicklung) zeigte sich ein höherer sozialer Einfluss der angeblich realen Fahrer: Nach ihrem Aussteigen aus dem simulierten PKW verließ der Proband das Fahrzeug schneller und häufiger als bei computergesteuerten Fahrern.

Somit geben diese Studien zahlreiche Hinweise darauf, dass das Vorhandensein realer Agenten in der virtuellen Welt einen Einfluss auf das Erleben und Verhalten hat.

Analog zu den übrigen Untersuchungsmethoden ist auch eine Bewertung der Pulksimulation möglich. Tabelle 2 zeigt abschließend den Vergleich zu den bestehenden Verfahren. Es ist zu sehen, dass die Pulksimulation viele Vorteile der anderen Versuchsumgebungen vereint. Dies ist insbesondere bezüglich der inhaltlichen Kriterien erkennbar. Somit kann die Pulksimulation aufgrund dieser theoretischen Überlegungen als eine Brücke zwischen Fahr- und Verkehrssimulation bezeichnet werden, die auch viele Vorzügen von Realfahrstudien enthält.

Tabelle 2: Bewertung der Pulksimulation im Vergleich zu den übrigen Untersuchungsmethoden anhand der in Kapitel 2.1.1 definierten Kriterien in positiv (+), neutral (o) und negativ (-) bzw. nicht vorhanden (n/a).

		Studien mit realen Fahrzeugen	Fahrsimulation	Verkehrssimulation	Pulksimulation
Methodische Kriterien	Kontrollierbarkeit der Situation	o	+	+	+
	Reaktivität	o	-	n/a	-
	Datenquantität	o	+	o	+
	Verallgemeinerbarkeit	+	o	o	o
Rahmenbedingungen	Ethische/rechtl. Einschränkungen	-	+	+	+
	Akzeptanz durch Probanden	+	o	n/a	o
	Techn. Umsetzungsmöglichkeiten	-	+	+	+
	Aufwand und Kosten	-	o	o	o
Inhaltliche Kriterien	Individuelles Fahrerverhalten	+	+	o	+
	Interaktionen	o	-	o	+
	Verkehrliche Wirkung	o	o	+	o

3 ZENTRALE FRAGESTELLUNG

Hinsichtlich der etablierten Untersuchungsmethoden konnten bereits viele Erfahrungen gesammelt werden (siehe Kapitel 2.1). Für die Pulksimulation existiert dagegen noch keine eingehende methodische Betrachtung. Es ist z. B. nicht bekannt, welche Anforderungen mit dem gleichzeitigen Einsatz mehrerer Probanden in einer Fahrsimulation einhergehen. Ebenso ist zu klären, welche Möglichkeiten sich bezüglich neuer Fragestellungen ergeben. Diese Aspekte müssen bearbeitet werden, bevor die Pulksimulation als Forschungswerkzeug genutzt werden kann. Daher ist das Ziel dieser Arbeit, eine Versuchsmethodik der Pulksimulation zur Untersuchung verkehrspsychologischer Fragen zu entwickeln und zu prüfen.

Jede Methode besitzt spezifische Vor- und Nachteile und es gibt bestimmte Rahmenbedingungen, unter denen sie verwendet bzw. nicht verwendet werden sollte. Bevor eine Methode ausgewählt wird, muss sich der Untersucher im Klaren sein, welche Eigenschaften sie hat und wie sie überhaupt anzuwenden ist. Wenn man dies während der Methodenanwendung weiß und berücksichtigt, können Methoden das „Problemlösungsmittel“ darstellen, als das sie von Herrmann (1999, S. 20) bezeichnet werden. Hierbei ist der gesamte Prozess des wissenschaftlichen Vorgehens relevant. Bezogen auf die experimentelle Psychologie stellen Reiß und Sarris (2012) hierzu ein Modell für Untersuchungen vor. Dieses besteht aus sechs Stufen, die im Rahmen einer experimentalpsychologischen Studie durchlaufen werden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Stufen des Modells für experimentalpsychologische Untersuchungen nach Reiß und Sarris (2012).

Stufe	Beschreibung
1. Problemstellung	Ein Problem mit entsprechenden Fragestellungen existiert, die mit der Untersuchung beantwortet werden sollen.
2. Versuchsplanung	Die Auswahl eines Schemas für die Untersuchung, mit dem die Fragestellungen beantwortet werden können.
3. Versuchsaufbau	Die Auswahl der Methodik bzw. der Instrumente (Versuchsumgebung, Versuchsmaterialien etc.), die verwendet werden sollen.
4. Versuchsdurchführung	Durchführung des Experiments und Beschreibung der Merkmale (Versuchsleiter, Instruktion, Störvariablen, etc.).
5. Datenanalyse	Deskriptive Beschreibung und inferenzstatistische Auswertung der im Experiment erhobenen Daten.
6. Schlussfolgerungen	Interpretation der Versuchsdaten und Schlussfolgerungen hinsichtlich weiterer Versuchsvorhaben.

Dieses Modell kann natürlich auch auf die Methodik der Pulksimulation angewendet werden. Es ist davon auszugehen, dass bei Studien in der Pulksimulation während jeder Stufe Besonderheiten zu berücksichtigen sind. Allein durch die gleichzeitige Anwesenheit mehrerer Fahrer stellen sich neue, bisher nicht gekannte Anforderungen an den Untersucher. Da die Pulksimulation eine neue Methode darstellt, müssen diese Spezifika eingehend betrachtet werden. Tabelle 4 beinhaltet eine Auflistung möglicher Fragen, die vor einer inhaltlichen Anwendung der Pulksimulation zu klären sind.

Tabelle 4: Beispiele für Fragen zur Methodik der Pulksimulation in den verschiedenen Stufen des Modells nach Reiß und Sarris (2012).

Stufe	Beispiele für Fragestellungen
1. Problemstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Für welche Fragestellungen ist die Pulksimulation geeignet? • Wann bringt die Pulksimulation dagegen keinen Mehrwert?
2. Versuchsplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Wie können Fragestellungen in der Pulksimulation operationalisiert werden? • Mit welchen Möglichkeiten können Interaktionen zwischen Fahrern provoziert werden?
3. Versuchsaufbau	<ul style="list-style-type: none"> • Wie muss das Simulationslabor gestaltet sein? • Wie viele Fahrstationen sollte die Pulksimulation besitzen?
4. Versuchsdurchführung	<ul style="list-style-type: none"> • Wie können mehrere Fahrer instruiert werden? • Welche Anforderungen an die Versuchsleitung entstehen durch die gleichzeitige Untersuchung mehrerer Fahrer? • Welche Verfahren und Strategien sind zu entwickeln, um die Überwachung der Fahrer zu ermöglichen?
5. Datenanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Wie können Daten der Pulksimulation dargestellt werden? • Mit welchen Parametern kann der Pulk beschrieben werden? • Wie können Interaktionen zwischen Fahrern erfasst und quantifiziert werden?
6. Schlussfolgerungen	<ul style="list-style-type: none"> • Wie ist die interne Validität von Ergebnissen aus der Pulksimulation zu bewerten? • Wie ist die externe Validität von Ergebnissen aus der Pulksimulation zu bewerten?

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, diese Fragen zu beantworten. Daher wird zunächst anhand erster experimenteller und explorativer Untersuchungsansätze eine Methodik der Pulksimulation entwickelt und die Besonderheiten dieser Versuchsumgebung herausgearbeitet. Darauf basierend, zeigen inhaltlich geleitete Studien Anwendungsbereiche der Pulksimulation auf. Abschließend werden die methodischen Erkenntnisse der Versuchsreihe gesammelt und diskutiert. Hierbei werden zusätzlich methodische Empfehlungen für die Verwendung dieser neuen Form der Fahrsimulation für weitere Studien gegeben.

4 AUFBAU DER PULKSIMULATION

Wie die theoretischen Überlegungen in Kapitel 2 gezeigt haben, ist die Pulksimulation eine sinnvolle Ergänzung zu den übrigen bislang verwendeten Versuchsmethoden. Aus diesem Grund wurde am Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW) ein Labor zur Durchführung von Studien in der Pulksimulation aufgebaut. Die technische Beschreibung des Simulationslabors erfolgt in diesem Kapitel.

4.1 Fahrstationen

Das Pulksimulationslabor des WIVW besteht aus fünf Fahrstationen. An jeder Fahrstation kann jeweils ein Proband sitzen und sein simuliertes Fahrzeug steuern (siehe Abbildung 5 links). Die Fahrzeuge sind in einer gemeinsamen virtuellen Umwelt unterwegs, in der sich die Fahrer gegenseitig sehen (siehe Abbildung 5 rechts) und auf das Verhalten der anderen Versuchsteilnehmer reagieren können.

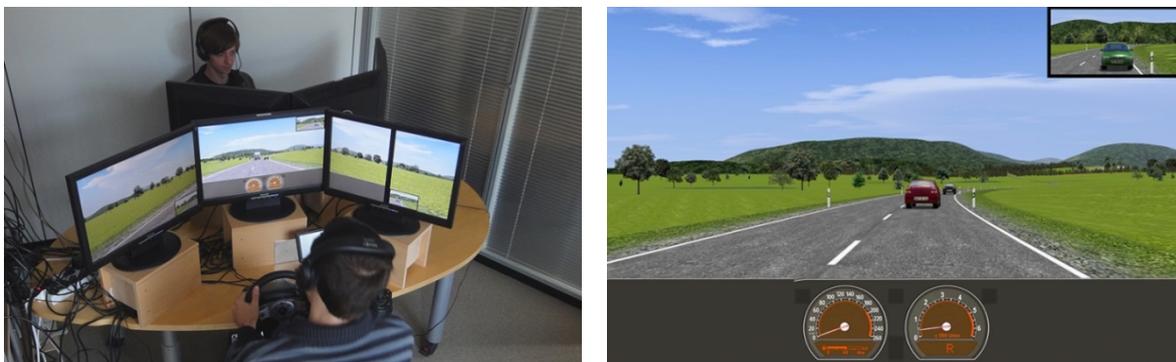


Abbildung 5: Fahrstationen der Pulksimulation (links). Frontsicht des dritten Fahrers eines Pulks mit vier Fahrzeugen – zu sehen sind die Fahrzeuge der anderen drei Probanden des Pulks in der Frontsicht sowie im Innenspiegel (rechts).

Jede der Fahrstationen verfügt über ein 150° horizontales Sichtfeld, bestehend aus drei 22“ LCD-Bildschirmen mit einer Auflösung von 1680x1050 Punkten (siehe Abbildung 6). Der linke Bildschirm zeigt die Sicht aus dem linken Seitenfenster sowie den linken Außenspiegel. Die Windschutzscheibe wird im mittleren sowie dem halben rechten Bildschirm dargestellt. Unterhalb der Windschutzscheibe wird das Kombiinstrument mit Tachometer, Drehzahlmesser und Fahrtrichtungsanzeiger eingeblendet, oberhalb ist der Innenspiegel zu sehen. Ein schwarzer Balken im rechten Bildschirm symbolisiert die rechte A-Säule, daneben ist das rechte Seitenfenster mit Außenspiegel dargestellt.



Abbildung 6: Sicht eines Fahrers über die drei LCD-Bildschirme mit den Einblendungen von Spiegeln und Kombiinstrument.

Als Mockup wird jeweils ein um Force Feedback erweitertes PC-Spielelenkrad (siehe Abbildung 7 links) mit Pedalerie (siehe Abbildung 7 Mitte) verwendet. Um den Blinker zu setzen, müssen die Fahrer Knöpfe auf der linken bzw. rechten Seite des Lenkrads betätigen. Als weiteres Eingabeinstrument steht links und rechts hinter dem Lenkrad jeweils eine Lenkradwippe zur Verfügung. Visuelle Nebenaufgaben und Anzeigen können auf einem LCD-Display mit 800x480 Punkten dargestellt werden (siehe Abbildung 7 rechts). Es handelt sich um einen Touchscreen, so dass auch Bedieneingaben (z. B. bei Befragungen) möglich sind.



Abbildung 7: Hardware der Pulksimulation: Lenkrad mit Lenkradwippen und Knöpfen zur Blinkerbetätigung (links), Pedalerie (Mitte), LCD-Display (rechts).

Vier der Fahrstationen befinden sich in dem Versuchsraum (sog. Simulatorraum). Dieser wird während der Versuchsdurchführungen abgedunkelt, um die Ablenkung der Fahrer durch die Umgebung oder die anderen Fahrer zu verringern. Die fünfte Station befindet sich außerhalb des Simulatorraums im Operatorraum.

Neben der Vernetzung der Fahrstationen ist möglich, das Pulksimulationslabor als fünf getrennte Einzelfahrsimulationen zu nutzen (sog. X4-Fahrsimulation). Hier fahren die Probanden parallel dieselbe Strecke in einer jeweils eigenen virtuellen Welt.

4.2 Datenaufzeichnung

Von der Fahrsimulationssoftware SILAB werden sowohl alle Parameter der Bedienung des Fahrzeugs (z. B. Gas- und Bremspedalnutzung, Lenkradwinkel, Nutzung der Lenkradwippen) als auch die Parameter des Fahrzeugmodells (z. B. Geschwindigkeit, Längsbeschleunigung) aufgezeichnet. Falls simulierter Umgebungsverkehr vorhanden ist, können mehrere Fahrparameter (z. B. Abstand, Geschwindigkeit) dieser virtuellen Fahrzeuge aufgezeichnet werden. Alle Daten werden mit einer Frequenz von 60 Hz aufgezeichnet.

4.3 Operatorenplatz

Im Rahmen der ersten Erfahrungen und Tests mit der Pulksimulation wurde eine Methodik für die Leitung von Versuchen in der Pulksimulation entwickelt. Am Operatorenplatz im Operatorraum steuern und überwachen der oder die Versuchsleiter den laufenden Versuch. Hier stehen ihnen generell zwei Hilfsmittel zur Verfügung:

- Durch die Vogelperspektive erhält der Operator einen Überblick über die gesamte Versuchssituation (siehe Abbildung 8 links). Die Fahrzeuge des Pulks werden entsprechend ihrer Farben in der Simulationsumwelt dargestellt, damit sie der Versuchsleiter bei Bedarf sofort identifizieren kann. Einzelne Fahrzeuge können hierbei hervorgehoben werden (z. B. durch einen farbigen Rahmen), wenn ein bestimmter Status eintritt (z. B. die Geschwindigkeit einen Schwellenwert überschreitet oder ein Assistenzsystem dem Fahrer eine Meldung anzeigt). Die Vogelperspektive kann als Video aufgezeichnet werden, um die Fahrt im Anschluss nochmals betrachten zu können.
- Durch die grafische Benutzeroberfläche der Simulationssoftware SILAB (siehe Abbildung 8 rechts) kann der Operator relevante Fahrdaten der einzelnen Fahrer (z. B. Abstände und Geschwindigkeiten) entweder als Zahlenwert oder als grafische Verlaufskurve live überwachen. Falls die aufgezeichneten Daten eines Fahrers bestimmte Schwellen (z. B. zulässige Höchstgeschwindigkeit) überschreiten, kann dies durch eine farbige Veränderung der Anzeige hervorgehoben werden. Die Daten der Fahrzeuge werden vergleichbar zur Vogelperspektive entsprechend ihrer Farben in der Simulationsumwelt dargestellt.



Abbildung 8: Vogelperspektive einer Kreuzungssituation mit vier Fahrzeugen (links). Benutzeroberfläche der Simulationssoftware SILAB (rechts).

Neben den Arbeitsplätzen der Operatoren befindet sich die fünfte Fahrstation (siehe Abbildung 9). Mit Hilfe dieser Station kann der Versuchsleiter selbst oder ein Vertrauter in der Szenerie fahren und gewünschte Fahrsituationen provozieren. Ist dieser Platz nicht besetzt, kann auf den verfügbaren Bildschirmen eine Mitschau der Frontsichten der einzelnen Fahrer gezeigt werden. Somit können die Operatoren den Versuch aus Fahrersicht verfolgen.



Abbildung 9: Operatorenplatz der Pulksimulation mit fünfter Fahrstation.

Die Kommunikation zwischen Versuchsleitung und Probanden erfolgt über Headsets. Hierfür wurde das Programm SILAB VoiceChat entwickelt. Dieses besitzt verschiedene Optionen, welche vom Operator gesetzt werden können:

- Kommunikationsmöglichkeiten des Operators
Der Operator kann entweder zu allen Fahrern gemeinsam (z. B. bei der Instruktion zu Beginn der Fahrt) oder gezielt zu einem Fahrer (z. B. Hinweis auf die Instruktion bei abweichendem Verhalten) sprechen.
- Kommunikationsmöglichkeiten des Probanden
Als Standardeinstellung ist vorgesehen, dass der Fahrer ausschließlich mit dem Operator kommunizieren kann (z. B. um Fragen zu stellen). Falls in einer Studie verbale Interaktionen zwischen Fahrern erforderlich sind, können die Fahrer sowohl untereinander als auch zu den Operatoren sprechen (z. B. bei kognitiven Nebenaufgaben während der Fahrt).

5 TRAINING FÜR DIE PULKSIMULATION

5.1 Hintergrund und Fragestellung

Bei Studien in der Fahrsimulation führt das Phänomen der Simulatorkrankheit dazu, dass ein Teil der in Studien eingesetzten Probanden den Versuch abbrechen muss. Die gewonnenen Daten können dann nicht mehr verwendet werden (siehe Kapitel 2.1.3). Allerdings kann ein Training zur Gewöhnung an die Fahrsimulation die Auftretenswahrscheinlichkeit der Simulatorkrankheit verringern (Hoffmann & Buld, 2006).

Außerdem können sich die verwendeten Bedienelemente in der Fahrsimulation von denen in realen Fahrzeugen unterscheiden, sodass sich die Probanden zunächst an das Simulatorfahrzeug gewöhnen müssen. Insbesondere bei den in der Pulksimulation verwendeten Fahrstationen gibt es größere Unterschiede zu realen Fahrzeugen, da das Mockup aus PC-Spielelenkrädern und -pedalieren besteht (siehe Kapitel 4.1). Ein Training sorgt dafür, dass die Ergebnisse der Studien nicht mit Lern- und Gewöhnungseffekten konfundiert sind.

Aus diesen Gründen soll auch für die Pulksimulation ein Trainingskonzept entwickelt und eingesetzt werden, um die Wahrscheinlichkeit einer Simulatorkrankheit zu reduzieren und den Probanden an die Bedienelemente zu gewöhnen. Durch Befragungen der Trainingsteilnehmer wird geprüft, ob dies erreicht wird und die einzelnen Übungen von den Fahrern als hilfreich eingeschätzt werden. Da das Training die erste Anwendung mit Probanden in der Pulksimulation darstellt, werden auch deren erste Eindrücke zu der neuen Methode erfasst. Hierdurch sollen Hinweise auf mögliche Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten gewonnen werden.

Als Referenz wird das Trainingsprogramm nach Hoffmann und Buld (2006) herangezogen, an dem sich die verwendeten Verfahren orientieren.

5.2 Methodik und Ablauf

Das Training besteht aus vier Fahrten und mehreren Befragungen. Es ist so konzipiert, dass bis zu vier Fahrer teilnehmen können. Insgesamt hat das Training eine Dauer von zwei Stunden. Es besteht sowohl aus Einzelfahrten, die parallel von den Fahrern in der X4-Simulation absolviert werden, als auch aus gemeinsamen Fahrten im Pulk.

5.2.1 Fahrt 1: Einzelfahrt auf Landstraße

Diese etwa 15 Minuten lange Fahrt dient vor allem dazu, die Probanden an die Bedienung der Fahrstation zu gewöhnen. Die Strecke ist relativ einfach gestaltet und besteht vor allem aus längeren Geraden und Kurven mit großen Radien.

Zunächst werden die Fahrer via Mikrofon vom Versuchsleiter gebeten, langsam auf 100 km/h zu beschleunigen. Nach einiger Zeit werden die Fahrer dazu aufgefordert, auf 40 km/h abzubremsen und anschließend wieder auf 100 km/h zu beschleunigen, um die Auswirkungen von Gas- und Bremspedalnutzung kennenzulernen.

Zur Hälfte der Strecke durchfahren die Probanden einen Ort, an dem von 100 km/h auf 50 km/h herabgebremst werden muss. In der Ortschaft muss ein auf dem Fahrstreifen parkendes Fahrzeug überholt werden, wobei das Blinken mit den Lenkradknöpfen geübt werden kann. Wenn die Probanden einen für den Versuchsleiter sicheren Eindruck über die Bedienung der Fahrstationen machen, werden sie dazu aufgefordert, vorsichtig Schlangenlinien auf der eigenen Spur zu fahren. Dadurch sollen sie mit der Lenkung vertraut werden.

Nach etwa drei Vierteln der Fahrt nähern sich die Fahrer einem simulierten Fahrzeug auf der eigenen Spur, dem die Probanden in sicherem Abstand folgen sollen. Dieses fährt mit relativ konstanter Geschwindigkeit und biegt nach einiger Zeit von der Straße ab. Anschließend erscheint ein weiteres simuliertes Fahrzeug auf der Fahrspur der Probanden, dem nun ebenfalls in sicherem Abstand gefolgt werden soll. Sobald auch dieses Fahrzeug abbiegt, fordert der Versuchsleiter die Fahrer über Mikrofon zum Anhalten auf. Die Fahrt ist damit beendet.

5.2.2 Fahrt 2: Pulkfahrt auf Landstraße

Vor Beginn dieser ersten gemeinsamen Fahrt wird den Fahrern die Pulkformation, in der diese Fahrt absolviert werden soll, auf einer Übersicht durch den Versuchsleiter dargestellt (siehe Abbildung 10). Jedem Fahrer wird sein entsprechendes Fahrzeug und die Fahrzeuge der anderen Fahrer gezeigt („Sie sitzen im roten Fahrzeug. Vor Ihnen fährt N.N. im grünen Fahrzeug, direkt hinter Ihnen M.M. im schwarzen und dahinter P.P. im grauen Fahrzeug.“).

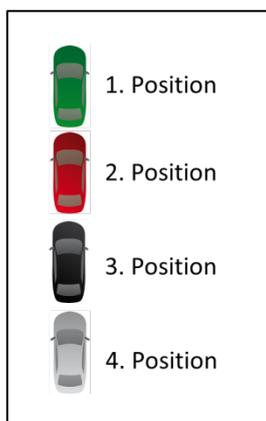


Abbildung 10: Übersicht über die Formation der Kolonne zur Verdeutlichung für die Fahrer.

Nach dieser Einführung wird dieselbe Strecke wie in Fahrt 1 gefahren. Die Fahrer starten in Kolonnenformation und sollen diese zunächst beibehalten. Es gibt hierbei keine Vorgaben bezüglich des Abstandverhaltens. Während der Fahrt wird der Fahrer des jeweils letzten Fahrzeugs im Pulk gebeten, nacheinander die vor ihm fahrenden Fahrzeuge zu überholen. Dadurch wird jedem Fahrer ein Perspektivenwechsel ermöglicht. Dieses Manöver wird solange wiederholt, bis jeder der Probanden einmal die anderen Teilnehmer überholt hat.

5.2.3 Fahrt 3: Bremsen, Beschleunigen und Fahrspurwechsel

Die dritte Fahrt erfolgt wieder einzeln und wird exakt dem Trainingsprogramm nach Hoffmann und Buld (2006) entnommen. Sie besteht aus zwei Übungen:

- (1) Die Übung „Bremsen und Beschleunigen“ dient dazu, Abstände einzuschätzen und punktgenau anzuhalten. Der Fahrer muss hierbei innerhalb eines bestimmten Streckenabschnitts auf eine vorgegebene Geschwindigkeit (100 km/h bzw. 120 km/h) beschleunigen. In einem weiteren Streckenabschnitt soll diese Geschwindigkeit konstant gehalten werden. Nach einer Markierung auf der Strecke soll der Fahrer so abbremesen, dass er an einem 100 m entfernten Stoppschild zum Stehen kommt.
- (2) In der Übung „Fahrspurwechsel“ trainiert der Fahrer die Lenkung des Simulatorfahrzeugs. Die Fahrspurwechsel werden durch Pylonengassen gekennzeichnet und es wird jeweils eine Geschwindigkeit (zunächst 30 km/h, später 50 km/h) vorgegeben.

5.2.4 Fahrt 4: Pulkfahrt auf der Autobahn

Die letzte Fahrt des Trainings erfolgt wieder gemeinsam. In dieser befahren die Probanden etwa 15 Minuten eine Autobahnstrecke mit simuliertem Umgebungsverkehr, um das Fahren mit höheren Geschwindigkeiten kennenzulernen. Ebenso wie in der zweiten Fahrt sollen sich die Fahrer nacheinander gegenseitig überholen, um einen Perspektivenwechsel zu erleben.

5.2.5 Befragungen

Nach jeder Fahrt werden die Probanden zu verschiedenen Aspekten derselben befragt (z. B. Anstrengung, Aufmerksamkeit, Spaß, Übelkeit). Die geschlossenen Fragen sollen mit Hilfe der Kategorienunterteilungsskala nach Heller (1985) beantwortet werden (siehe Abbildung 11). Diese Skala besteht aus sechs verbalen Kategorien, die bis auf die Null-Kategorie nochmals in drei numerische Stufen unterteilt sind. Die Probanden entscheiden sich zunächst für eine der groben verbalen Kategorien und können ihr Urteil anhand der numerischen Unterteilung nochmals genauer differenzieren.

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			viel			sehr viel		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Abbildung 11: Kategorienunterteilungsskala.

Am Ende des Trainings erfolgt eine offene Abschlussbefragung. Hier sollen sich die Fahrer zu dem ersten Eindruck der Pulksimulation (positive und negative Kommentare) und möglichen Verbesserungen äußern. Die Befragung wird als Interview durchgeführt, wobei jeder Versuchsleiter ein bis zwei Probanden gleichzeitig befragt.

5.2.6 Versuchsleitung

Jedes Training in der Pulksimulation wird von zwei Versuchsleitern begleitet. In den Einzelfahrten betreut jeder der Versuchsleiter je nach Anzahl der Teilnehmer ein bis zwei Probanden. Am Operatorenplatz wird während der Einzelfahrten jedes der vier Fahrzeuge aus Vogelperspektive auf einem eigenen Bildschirm dargestellt (siehe Abbildung 12 links). Wichtige Informationen wie Streckenmeter, Geschwindigkeit und laterale Position werden direkt in diesen Bildschirm eingeblendet (siehe Abbildung 12 rechts).



Abbildung 12: Operatorenplatz für die Einzelfahrten im Training. Jedes der vier Pulkfahrzeuge wird auf einem separaten Bildschirm dargestellt (links). Wichtige Informationen werden direkt in den Bildschirm eingeblendet (rechts).

In den Pulkfahrten unterscheidet sich die Aufgabenverteilung der beiden Versuchsleiter von jener der Einzelfahrten: Einer der Versuchsleiter überwacht die globale Fahrsituation aller Fahrer und konzentriert sich hierbei auf die Vogelperspektive (siehe Kapitel 4.3). So prüft er beispielsweise, ob die Fahrer noch zusammen fahren und gibt die generellen Kommandos an alle Fahrer (wie z. B. Aufforderung zum Losfahren bei Beginn einer Fahrt). Der andere Versuchsleiter richtet seine Konzentration auf die Fahrdatenverläufe der einzelnen Fahrer in der SILAB-Benutzeroberfläche (siehe Kapitel 4.3). So überwacht er beispielsweise die Spurhaltung der vier Fahrer und gibt bei größeren Spurabweichungen einzelner Fahrer direkt Rückmeldung und Hilfestellung.

5.3 Ergebnisse

Insgesamt haben an den Trainings zum Fahren in der Pulksimulation $N = 94$ Probanden teilgenommen (Stand März 2013). Die Stichprobe besteht aus 49 Frauen und 45 Männern. Sie waren zwischen 22 und 66 Jahren alt ($M = 35.7$, $SD = 11.7$).

5.3.1 Effekte des Trainings

Generell werden alle Übungen als mittel bis sehr hilfreich für die Beherrschung des Simulatorfahrzeugs bewertet (siehe Abbildung 13 links). Zudem ist ein subjektiver Lerneffekt über die Zeit zu beobachten: Schon nach der ersten Fahrt geben die Probanden an, das Fahrzeug mittel sicher zu beherrschen. Nach der gemeinsamen Landstraßenfahrt ($t(93) = 5.86; p < .001$) und dann nochmals nach der gemeinsamen Autobahnfahrt ($t(93) = 7.68; p < .001$) steigt die wahrgenommene Sicherheit stetig an (siehe Abbildung 13 rechts).

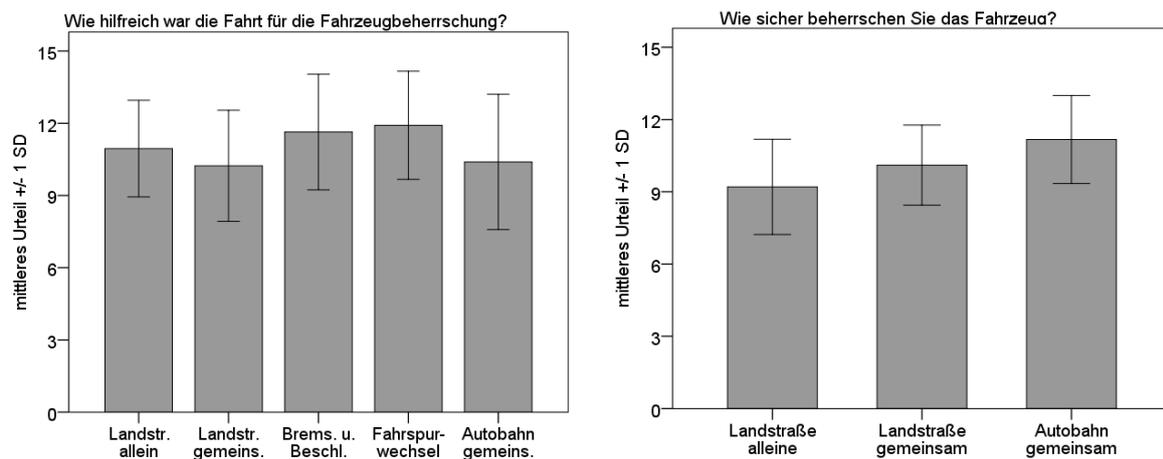


Abbildung 13: Urteile der Fahrer zur Nützlichkeit der Übungen (links). Urteile der Fahrer zur Fahrzeugbeherrschung nach den Landstraßen- und Autobahnfahrten (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Am Ende des Trainings geben 38.3 % der Fahrer an, nichts mehr für die Beherrschung des Fahrzeugs erlernen zu müssen. 16.0 % würden gerne nochmal Fahrspurwechsel und 7.4 % das Bremsen und Beschleunigen üben. 17.3 % wünschen sich eine Stadtfahrt, um das Abbiegen an Kreuzungen zu verbessern.

5.3.2 Simulatorübelkeit und körperliche Beschwerden

Nach jeder der vier Fahrten wurden die Probanden befragt, ob ihnen während der Fahrt übel geworden sei. Nur einer der Fahrer bejahte diese Frage. In der Abschlussbefragung wurden von wenigen Fahrern Verkrampfungen im Fuß ($n = 3$), Augenprobleme ($n = 2$), Rückenbeschwerden ($n = 3$) sowie leichte Schwindelgefühle ($n = 2$) genannt. Dies spricht für eine relativ gute Verträglichkeit des Fahrens an den Fahrstationen der Pulksimulation.

5.3.3 Effekte des Fahrens im Pulk

Da Fahrt 1 und Fahrt 2 bis auf das gemeinsame Fahren im Pulk identisch waren, kann ein Vergleich dieser Fahrten den Effekt des Fahrens im Pulk aufzeigen (siehe Abbildung 14). Die Fahrer geben an, im Pulk aufmerksamer ($t(93) = 2.48; p = .015$) gefahren zu sein. Weiterhin wird die Fahrt als anstrengender beurteilt ($t(93) = 9.87; p < .001$), hat aber mehr Spaß gemacht ($t(93) = 6.35; p < .001$).

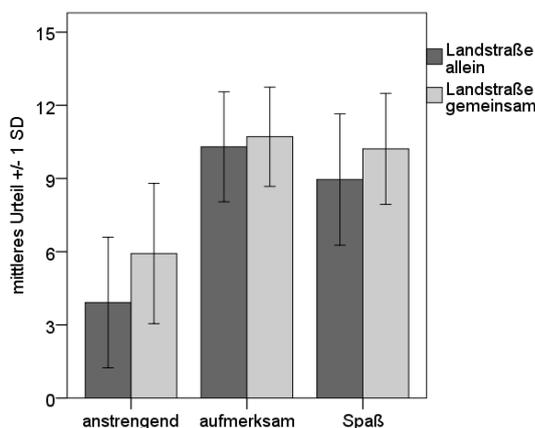


Abbildung 14: Urteile der Fahrer bei der Landstraßenfahrt alleine bzw. gemeinsam. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

5.3.4 Offene Kommentare

Nach dem Training in der Pulksimulation sollten die Probanden ihre Erfahrungen schildern. Insbesondere die Tatsache, dass reale Fahrer den Umgebungsverkehr abbilden, wird von dem Großteil der Probanden als positiv eingeschätzt: So nennen 32.9 % als positiven Faktor, dass das Fahrverhalten des Umgebungsverkehrs realistischer ist. Weiterhin wird das Fahren in der Pulksimulation aufgrund der realen Mitfahrer von 29.8 % als interessanter, spannender oder abwechslungsreicher bewertet:

- „Die Fehler der [realen] Fahrer sind realitätsgenauer. Die simulierten Fahrzeuge halten perfekt die Spur, Menschen fahren leicht versetzt“
- „Die anderen Fahrzeuge verhalten sich realistischer“
- „Andere Fahrzeuge fahren nicht wie Roboter“
- „Das Fahren mit Anderen macht mehr Spaß“
- „Realistischer als mit programmierten Mitfahrern, z. B. nicht so abgehackte Spurwechsel“
- „Reaktionen der echten Fahrer sind realistischer als die simulierten Fahrzeuge“
- „Es war spannender, da man wusste, dass die Fahrzeuge von einem Mensch und nicht vom Computer gesteuert sind“
- „Realistischer, weil andere Pulkfahrer die Spur weniger genau halten“

Weiterhin werden das Bremsverhalten (12.8 %), das Lenkverhalten (10.6 %) sowie die grafische Darstellung (10.6 %) als gut beurteilt. 5.3 % der Fahrer geben an, dass das Nicht-Auftreten von Schwindel oder Übelkeit positiv ist.

Im Gegensatz dazu werden auch Probleme genannt, die sich in den meisten Fällen auf die Hardware der Pulksimulation beziehen: Für knapp ein Drittel der Fahrer (29.8 %) sind die Pedale zu nah aneinander positioniert. Dies führe dazu, dass Brems- und Gaspedal leicht

verwechselt werden könnten. 19.1 % der Fahrer wünschen sich ein größeres Lenkrad und 18.1 % der Fahrer beurteilen das Blinken mit den Lenkradknöpfen als ungewohnt. Manche Fahrer müssten daher ihre Handstellung am Lenkrad ändern. Für 18.1 % ist die Sitzposition auf Bürostühlen unbequem bzw. unpraktisch.

Darüber hinaus bemängeln einige Fahrer das Fahrzeugmodell der Pulksimulation. Die Lenkübersetzung wird von 22.3 % und das Brems- bzw. Beschleunigungsverhalten von 12.8 % als ungewohnt beschrieben.

5.3.5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Befragung weisen auf die Notwendigkeit des Trainings bezüglich des Fahrzeughandlings hin. So wird das Mockup der Pulksimulation (vor allem Lenkrad und Pedalerie) sowie das Fahrverhalten des Simulatorfahrzeugs (insbesondere Beschleunigung und Lenkverhalten) als gewöhnungsbedürftig beschrieben. Durch die Übungen werden diese Inhalte gezielt trainiert und die Teilnehmer berichten von einem Lernfortschritt, da laut ihrer Aussage die Sicherheit in der Fahrzeugbeherrschung mit zunehmender Übung steigt.

Hinsichtlich Simulatorübelkeit ist das Training nicht unbedingt notwendig, da nur einer der $N = 94$ Teilnehmer von diesem Problem betroffen war. Dies spricht für eine gute Verträglichkeit des Fahrens an den Fahrstationen der Pulksimulation.

Im ersten Eindruck der Probanden wird vor allem der Einsatz realer Fahrer zur Darstellung des umgebenden Verkehrs gelobt. Diese zeigen laut den Probanden ein realistischeres Fahrverhalten als die modellierten Fahrermodelle.

6 ERSTE UNTERSUCHUNGSANSÄTZE

6.1 Ziel der ersten Untersuchungsansätze

Die Besonderheit der Pulksimulation besteht im gleichzeitigen Einsatz mehrerer Fahrer, wodurch Interaktionen untersucht werden können. Es stellt sich die Frage, wie diese Möglichkeit in künftigen Studien genutzt werden kann. Da die Pulksimulation ein neues Verfahren ist, für das bisher nur äußerst wenige Erfahrungen vorliegen, müssen als Erstes die grundlegenden methodischen Besonderheiten kennengelernt werden.

Zunächst ist zu klären, was überhaupt ein Pulk aus Fahrern ist und wie sich das Fahren in diesem Pulk vom alleinigen Fahren ohne Pulk unterscheidet. Anschließend muss bestimmt werden, welche Bedeutung die Anordnungen und Positionen der Fahrer zueinander für die Interaktion haben und inwiefern sich die Fahrer gegenseitig beeinflussen. Weiterhin sind Parameter notwendig, die den Pulk beschreiben und die Interaktionen der Fahrer darstellen und messen können. Es ist zu prüfen, ob mit Hilfe dieser Parameter auch Variationen von Pulks unterschieden werden können. Daher werden in den ersten Untersuchungen Manipulationen eingeführt, um unterschiedliche Pulks zu erzeugen.

Da die Pulksimulation als neue Methode zwischen Fahr- und Verkehrssimulation zu sehen ist, müssen diese Fragen stets im Vergleich zu diesen bisher genutzten Versuchsumgebungen gesehen werden. Daher ist auch zu prüfen, inwiefern sich die Ergebnisse von Studien in diesen Versuchsumgebungen von denen der Pulksimulation unterscheiden.

6.2 Methodik

6.2.1 Fahraufgabe

Um die vorangestellten Fragen zu beantworten, existiert eine Vielzahl an Möglichkeiten. So könnten die Fragestellungen beispielsweise am Kreuzen, Folgen oder beim Entgegenfahren auf einer Straße betrachtet werden. Da die folgende Studie einen ersten Untersuchungsansatz in der Pulksimulation darstellt, wird sich bei der Auswahl des Szenarios auf eine eher weniger komplex zu untersuchende Fahraufgabe beschränkt.

Daher wird in diesem Kapitel insbesondere das Folgefahren betrachtet, da dies aufgrund verschiedener Aspekte eine relativ einfache Untersuchung ermöglicht: Das Folgefahren ist eine gut kontrollierte Situation mit nur wenigen Freiheitsgraden, da die Fahrer nahezu

ausschließlich folgen und Abstand halten müssen. Verschiedene Abstandsmaße (z. B. Time-Headway und Time-to-collision) stellen Parameter für das Einzelfahrzeug dar, die das Folgeverhalten beschreiben können. Für die Abgrenzung von sicherheitskritischen Situationen liegen in der Literatur Schwellen dieser Maße vor. Mit der Zwei-Sekunden-Regel und der Empfehlung „halber Tacho einhalten“ existieren weitverbreitete Regeln zum Folgefahren. Zudem liegen zum Folgefahren viele Daten aus anderen Untersuchungen in Realverkehr und Simulation vor, mit denen die in der Pulksimulation gewonnen Ergebnisse verglichen werden können.

Neben dem Folgefahren ist auch das Kreuzen ein interessanter Anwendungsbereich für die Pulksimulation. Insbesondere Fragestellungen der Fahrsicherheit spielen hier eine Rolle, da Kreuzungen oft einen Unfallschwerpunkt darstellen. Aus diesem Grund wird in der folgenden Untersuchung zusätzlich ein erster Blick auf das Fahrverhalten an Kreuzungen geworfen.

6.2.2 Versuchsstrecken

Für diese Studie wurden zwei Arten von Strecken verwendet: Während die eine Strecke das Folgefahren in verschiedensten Fahrsituationen untersuchte, wurde mit Hilfe der anderen Strecke das Verhalten an Kreuzungen betrachtet.

Strecke „Folgefahren“

Insgesamt wurden vier Strecken A, B, C und D mit einer Länge von jeweils 24.5 km entworfen. Jede Strecke enthielt dieselben Streckenelemente:

- Einfahrtsgerade (Länge 1000 m)
- Kurvige Strecke im Wald (Länge 7500 m) mit einem unerwarteten Ereignis. Dieses wurde in den Strecken variiert:
 - Strecke A und C: Pannenfahrzeug in einer schlecht einsehbaren Kurve mit Gegenverkehr (siehe Abbildung 15 oben), wodurch starkes Abbremsen auf 0 km/h notwendig wurde (Geschwindigkeitsbegrenzung von 70 km/h)
 - Strecke B und D: Kiste hinter einer Kuppe ohne Gegenverkehr (siehe Abbildung 15 unten), wodurch Ausweichen notwendig wurde (Geschwindigkeitsbegrenzung von 100 km/h)
- Durchfahren einer Stadt (Länge 1000 m) mit einer roten Ampel
- Weitestgehend gerade Landstraße (Länge 7800 m) mit einer roten Ampel
- Weitestgehend gerade Landstraße (Länge 6000 m) mit Überholen eines langsamen Fahrzeugs, das auf einer Strecke mit Geschwindigkeitsbeschränkung von 100 km/h nur 60 km/h fuhr (siehe Abbildung 16 oben)
- Durchfahren einer Ortschaft (Länge 1200 m) mit Überholen eines parkenden Fahrzeugs (siehe Abbildung 16 unten)



Abbildung 15: Annäherung in der Situation „Pannenfahrzeug“ in einer schlecht einsehbaren Kurve mit Gegenverkehr (oben links bis oben rechts) und in der Situation „Kiste“ hinter eine Kuppe ohne Gegenverkehr (unten links bis unten rechts).



Abbildung 16: Annäherung in der Situation „Überholen eines langsameren Fahrzeugs“ (oben links bis oben rechts) und in der Situation „Überholen eines parkenden Fahrzeugs“ (unten links bis unten rechts).

Die Reihenfolge dieser Elemente war in den vier Strecken jeweils unterschiedlich (siehe Tabelle 5), um bei einem Abfahren aller Strecken Ermüdungs- und Monotonieeffekte abzuschwächen. Zusätzlich variierten die Ortsnamen sowie die Bebauung und die Bepflanzung.

Die vier Versuchsfahrer befuhren die Strecken hintereinander in Kolonnenformation. Sie erhielten hierbei Abstandsinstruktionen (siehe Kapitel 6.2.3) und durften sich nicht gegenseitig überholen.

Tabelle 5: Streckenabfolgen der vier Strecken A, B, C und D.

Strecke A	Strecke B	Strecke C	Strecke D
Einfahrtsgerade	Einfahrtsgerade	Einfahrtsgerade	Einfahrtsgerade
kurvige Landstraße (Pannenfahrzeug)	Stadt	Landstraße mit Über- holen	Landstraße mit roter Ampel
Stadt	Landstraße mit roter Ampel	Ortschaft	Ortschaft
Landstraße mit Über- holen	kurvige Landstraße (Kiste)	Landstraße mit roter Ampel	Landstraße mit Über- holen
Ortschaft	Ortschaft	kurvige Landstraße (Pannenfahrzeug)	Stadt
Landstraße mit roter Ampel	Landstraße mit Über- holen	Stadt	kurvige Landstraße (Kiste)

Strecke „Kreuzungen“

In der Strecke zum Fahren an Kreuzungen sollten die Probanden mit einer möglichst hohen Wahrscheinlichkeit von verschiedenen Seiten aus gleichzeitig an eine Kreuzung gelangten, um so Interaktionen zwischen den Fahrern zu erzeugen. Dies wurde durch folgenden Aufbau eines Kreuzungsabschnitts (siehe Abbildung 17) realisiert:

1. Startformation: Die Fahrer starteten gleichzeitig in Kolonnenformation auf einer Landstraße. Hier sollten sie dicht beieinander bleiben, bis die Strecke sich teilt.
2. Auftrennung: An einer Abzweigung der Strecke bogen zwei der vier Fahrer nach links, zwei andere nach rechts ab.
3. Kreuzungsannäherung: Nun näherten sich jeweils zwei Fahrer von verschiedenen Seiten der Kreuzung an. Die beiden Kreuzungsanfahrlen waren ungefähr gleich lang und es galt die gleiche Geschwindigkeitsbeschränkung.
4. Kreuzungsdurchfahrt: Eines der beiden Fahrzeuge jeder Richtung durchfuhr die Kreuzung gerade, das andere bog rechts bzw. links ab.
5. Zusammenführung: Nach der Kreuzungsdurchfahrt wurden die Fahrer mittels einer weiteren Kreuzung wieder in die Kolonnenformation zusammengeführt, sodass sie wieder auf der Landstraße an einem Stoppschild gemeinsam zum Stehen kamen.

Anschließend begann die nächste Kreuzungsanfahrt. Insgesamt gab es acht ähnlich aufgebaute Abschnitte, die direkt hintereinander befahren wurden. Zu Beginn jeder Anfahrt (im Stand am ersten Stoppschild) teilte der Versuchsleiter jedem Fahrer separat per Mikrofon mit, wie er im Verlaufe der Strecke fahren sollte (z. B. „an der ersten Abzweigung rechts und dann an der Kreuzung geradeaus“).

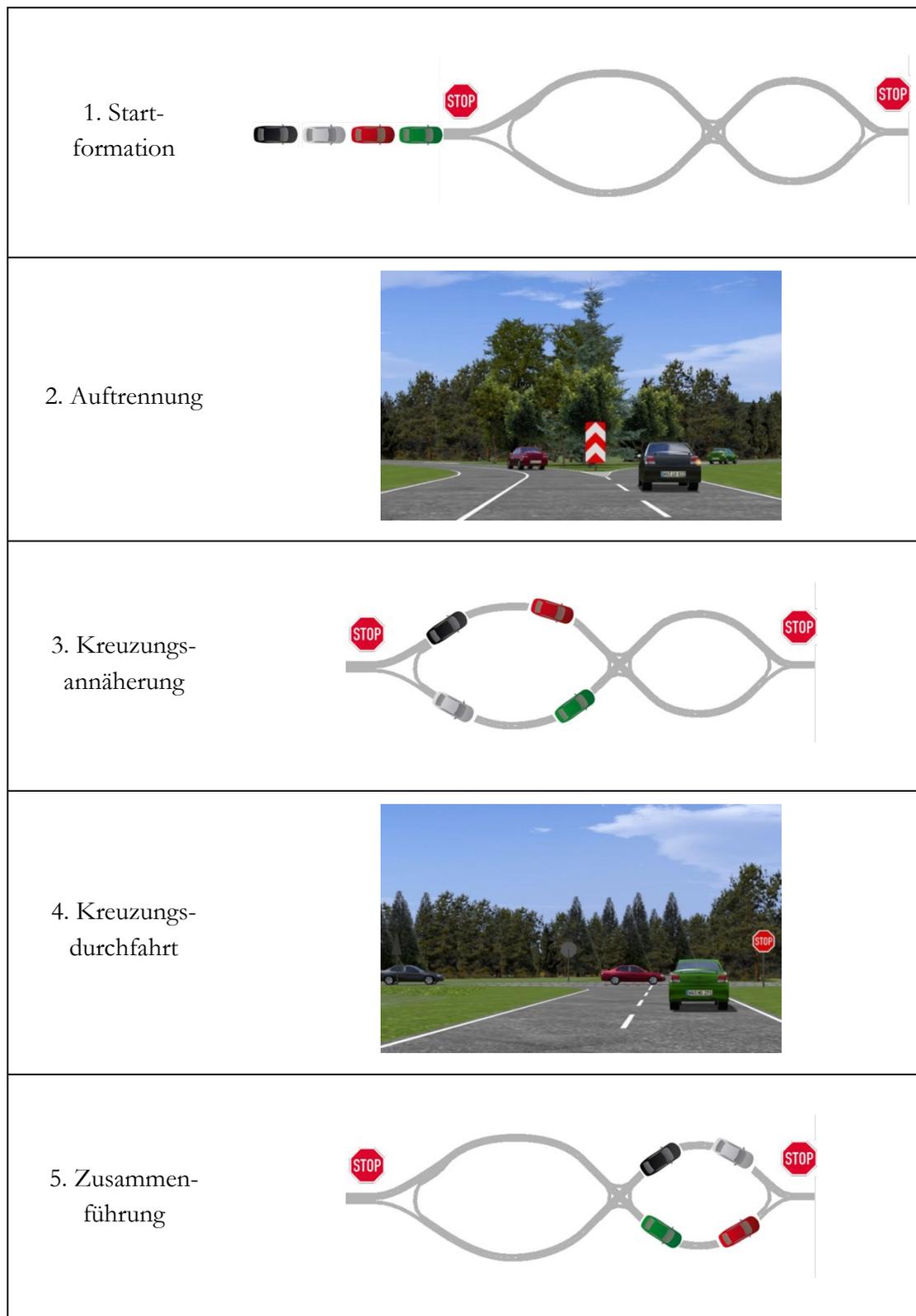


Abbildung 17: Beispielhafter Ablauf eines Kreuzungsszenarios von der Startformation bis hin zur Zusammenführung. Die Auftrennung und die Kreuzungsdurchfahrt werden aus Sicht eines Fahrers im Pulk dargestellt.

6.2.3 Experimentelle Manipulationen

Für einige der Fragestellungen wurden experimentelle Manipulationen eingeführt. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

6.2.3.1 Art der Fahrt

Um Einzel- und Pulkfahrt miteinander vergleichen zu können, befuhren die Fahrer Strecke B einmal alleine ohne Umgebungsverkehr (in der X4-Simulation) und einmal in einer Pulk-Folgefahrt (in der Pulksimulation).

6.2.3.2 Positionierung

Die Positionierung im Folgefahrt-Pulk besteht aus vier Stufen, da stets im Viererpulk gefahren wurde. Während Position 1 die Strecke ohne Führungsfahrzeug befuhr, folgten die hinteren Fahrer einem, zwei oder drei anderen Fahrzeugen.

6.2.3.3 Instruktionen

In den Fahrten zum Folgefahren wurden verschiedene Instruktionen zur Abstandshaltung als unabhängiger Faktor eingeführt. Dies war zum einen die Instruktion „halber Tacho einhalten“, die oftmals als Faustregel für den Abstand empfohlen wird. Nach dieser Regel sollte z. B. bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h der Abstand auf etwa 50 m einjustiert werden.

Weiterhin wurden in Anlehnung an eine Untersuchung von Taieb-Maimon und Shinar (2001) folgende Instruktionen verwendet: „Komfortabel sicher“ und „geringstmöglich sicher“. Hierdurch sollte die Varianz an gefahrenen Abständen erhöht werden, da davon ausgegangen wurde, dass der geringstmögliche Abstand kleiner und der komfortable Abstand größer als der halbe Tacho sein würden.

6.2.3.4 Nebenaufgabe

Die Probanden hatten die Aufgabe, abwechselnd und in randomisierter Fahrerreihenfolge aufwärts beginnend bei „1“ zu zählen. Jede Ziffer, die eine „3“ beinhaltete oder durch „3“ teilbar war, sollte durch das bedeutungslose Wort „blubb“ ersetzt werden. Da die Kommunikation während dieser Fahrt so programmiert war, dass die Fahrer miteinander sprechen konnten, hörten die Fahrer jeweils die Antworten der anderen Fahrer. Ein Gong, der im Headset des betreffenden Fahrers ertönte, bestimmte den Fahrer, der die nächste Antwort geben musste (siehe Abbildung 18).

Die Aufgabe wurde den Probanden vor der Fahrt erklärt und gemeinsam geübt. Vorversuche haben gezeigt, dass diese Nebenaufgabe die Beanspruchung während des Fahrens zu erhöht. Die Nebenaufgabe wurde während einer Fahrt im Pulk auf Strecke C von den Fahrern bearbeitet. Als Kontrollbedingung wurde dieselbe Strecke ohne Nebenaufgabe befahren.

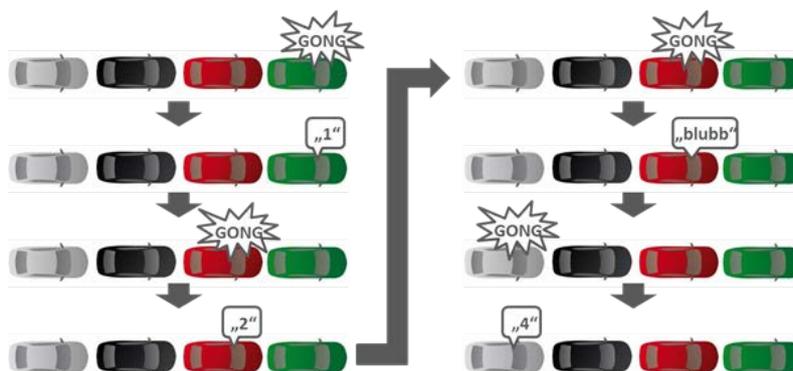


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Ablaufs der Nebenaufgabe. Ein Gong bestimmt den Fahrer, der an der Reihe ist. Dieser nennt daraufhin die nächste Zahl bzw. das Wort „Blubb“.

6.2.4 Stichprobe

An den ersten Untersuchungen nahmen insgesamt $N = 40$ Probanden (16 Frauen, 24 Männer) im Alter von 20 bis 64 Jahren ($M = 36.2$ Jahre; $SD = 12.6$) teil. Diese stammten aus dem Testfahrerpanel des WIVW und absolvierten zuvor das Training in der Pulksimulation (siehe Kapitel 5). Für die Teilnahme erhielten die Fahrer eine Aufwandsentschädigung.

Nicht alle der $N = 40$ Fahrer durchfuhren alle Fahrten dieser ersten Untersuchung. Eine Übersicht über die Stichprobengrößen der einzelnen Fragestellungen findet sich in Tabelle 6.

Tabelle 6: Übersicht über Stichprobengrößen der einzelnen Fragestellungen.

Kapitel	Fragestellung	Stichprobe	Anmerkung
6.3.1	Wie unterscheidet sich eine Pulkfahrt von einer Einzelfahrt?	$N = 24$	
6.3.2	Welchen Einfluss haben nachfolgende Fahrzeuge im Pulk?	$N = 6$	
6.3.3	Welche Effekte haben Positionierungen im Pulk?	$N = 16$	
6.3.4	Wie unterscheiden sich reale Fahrer und Modelle im Pulk?	$N = 16$	
6.3.5	Wie wirkt sich die Einführung einer Nebenaufgabe auf den Pulk aus?	$N = 16$	
6.3.6	Wie wirken sich verschiedene AbstandsInstruktionen aus?	$N = 40$	Halber Tacho: $n = 16$ Geringstmöglich: $n = 12$ Komfortabel: $n = 12$
6.3.7	Mit welchen Parametern kann der Pulk beschrieben werden?	$N = 40$	Querführung: $n = 16$ Längsführung: $n = 24$
6.3.8	Wie kann das Verhalten des Pulks an Kreuzungen untersucht werden?	$N = 24$	

6.3 Fragestellungen¹

6.3.1 Wie unterscheidet sich eine Pulkfahrt von einer Einzelfahrt?

Zunächst stellt sich die Frage, mit welchen Effekten das Fahren im Pulk einhergeht. Dies kann durch den Vergleich einer Pulkfahrt mit einer Fahrt ohne Pulk, d. h. einzeln ohne Umgebungsverkehr, identifiziert werden. Durch die Einführung des Umgebungsverkehrs, der den Pulk bildet, müssen sich die Fahrer im Fahrverhalten anpassen. In welchen Bereichen diese Anpassungen mit welchem Ausmaß erfolgen, wird in diesem Kapitel beantwortet.

Hierzu fuhren $N = 24$ Fahrer die Landstraßenstrecke C einmal alleine in der X4-Simulation und einmal im Pulk. Somit war das Mockup der Simulationsumgebung jeweils dasselbe und eine Konfundierung durch unterschiedliche Bedienelemente ist auszuschließen. Die eine Hälfte der Fahrer begann mit der Einzelfahrt, die andere Hälfte mit der Pulkfahrt. In der Pulkfahrt lautete die Instruktion, entweder möglichst geringen oder komfortablen Abstand zu halten.

Nach jeder Fahrt wurden Fragebögen zur Beurteilung vorgelegt. Sie thematisierten verschiedene Aspekte des Fahrens und sollten anhand der 16-stufigen Kategorienunterteilungsskala (siehe Kapitel 5.2.5) beantwortet werden. Nach der zweiten Fahrt wurden Abschlussbefragungen zum direkten Vergleich der Fahrten mittels bipolarer fünfstufiger Skalen verteilt. Diese reichten von „-2“ bis „+2“, wobei der mittlere Wert „0“ der Einzelfahrt entsprach.

6.3.1.1 Subjektive Daten

Die Auswertung der Fahrtbefragung erfolgte mit Hilfe von t -Tests für abhängige Stichproben. Die Fahrt im Pulk wird von den Fahrern als schwieriger ($t(23) = 2.68; p = .013$; siehe Abbildung 19 links) und anstrengender ($t(23) = 2.58; p = .017$) beurteilt. Keine Unterschiede gibt es stattdessen bei den übrigen Aspekten, z. B. bei Sicherheit ($t(23) = 0.33; p = .745$), Aufmerksamkeit ($t(23) = 0.39; p = .698$) und Spaß ($t(23) = 0.42; p = .681$).

Für die Analyse der Abschlussbefragung wurden Einstichproben- t -Tests gegen den Testwert „0“ verwendet. Ein signifikantes Ergebnis besagt somit, dass sich die Pulkfahrt von der Einzelfahrt unterscheidet. Demzufolge wird die Pulkfahrt als unangenehmer ($t(21) = 2.58; p = .017$; siehe Abbildung 19 rechts)², realistischer ($t(20) = 3.23; p = .004$) und langsamer ($t(21) = 2.81; p = .011$) bewertet. Zudem geben die Fahrer an, sich stärker in der Pulkfahrt konzentriert zu haben ($t(21) = 2.02; p = .056$).

¹ Die hier berichteten Daten wurden unter anderem im Rahmen zweier „Praktika zur Verkehrspsychologischen Forschung“ (Will, 2011; Zimmer, 2011) erhoben. Die Ideen zur Versuchsplanung und -durchführung entstammen stets vom Autor der vorliegenden Arbeit. Die hier dargestellten Daten wurden neu ausgewertet, neu dargestellt und nicht aus den Arbeiten von Will (2011) und Zimmer (2011) entnommen.

² Die Freiheitsgrade von 21 ergeben sich, da bei zwei der Probanden die Abschlussbefragung nicht erfolgte. Somit haben nur 22 Fahrer die Abschlussbefragung bearbeitet.

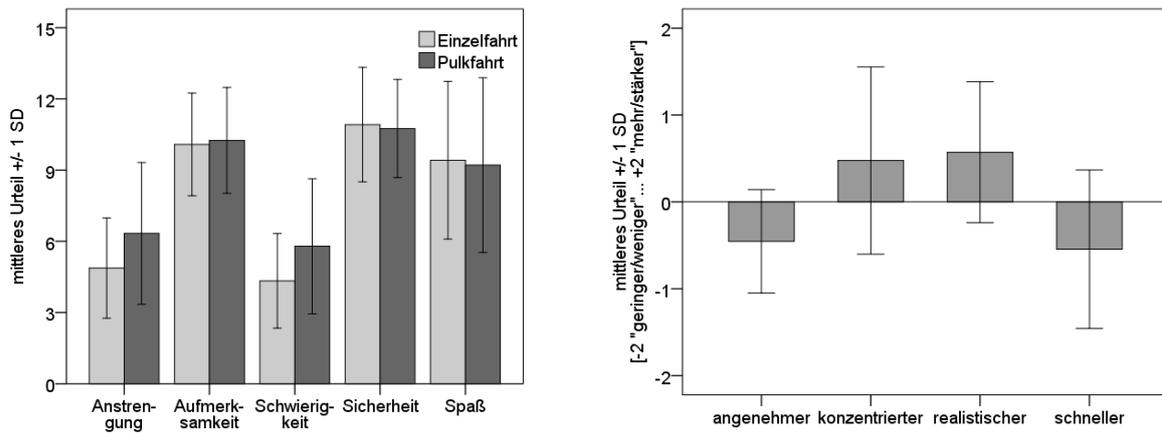


Abbildung 19: Ergebnisse ausgewählter Items der Fahrtbefragung (links) sowie der Abschlussbefragung (rechts). Bei der Abschlussbefragung kennzeichnet die waagrechte Linie den Testwert „0“, welcher der Einzelfahrt entspricht. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

6.3.1.2 Fahrdaten

Der Vergleich der Fahrdaten für die beiden Fahrten erfolgte exemplarisch an zwei Streckenabschnitten. Diese sollten möglichst unterschiedlich sein, um zu prüfen, ob die Ergebnisse abhängig von Streckenfaktoren sind. Es wurden ausgewählt:

- Eine 2.0 km lange gerade und übersichtliche Landstraßenstrecke mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h („gerade Landstraße“)³.
- Eine 1.8 km lange kurvige Landstraßenstrecke im Wald mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h („kurvige Landstraße“).

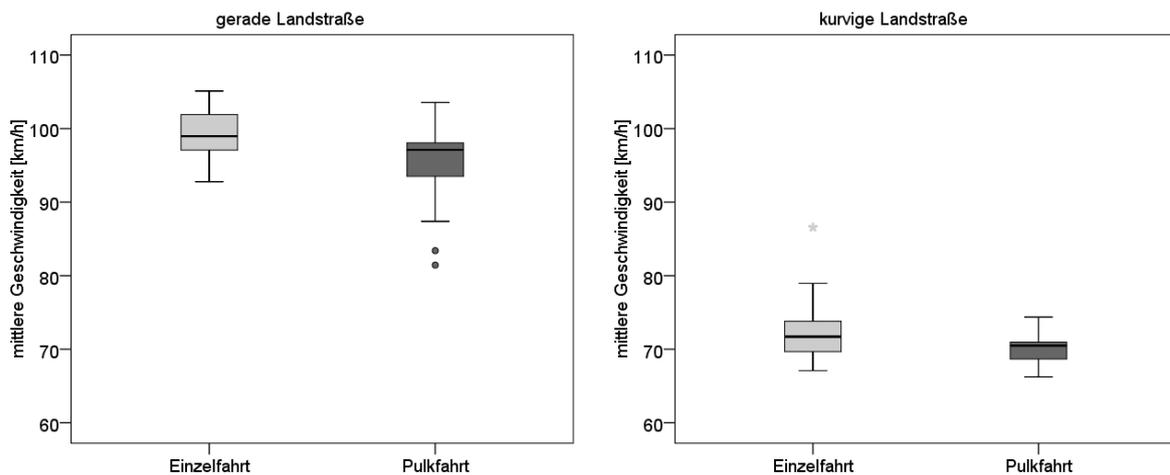


Abbildung 20: Mittlere Geschwindigkeiten in Einzel- und Pulkfahrt für die gerade (links) und die kurvige (rechts) Landstraße. Dargestellt sind Boxplots.

³ Auf dem geraden Stück musste ein Fahrer aus der Auswertung genommen werden, da in der Einzelfahrt an dieser Stelle kurzzeitig technische Störungen aufgetreten sind.

Sowohl auf dem geraden ($t(22) = 3.40; p = .003$; siehe Abbildung 20 links) als auch dem kurvigen Abschnitt ($t(23) = 2.57; p = .017$; siehe Abbildung 20 rechts) wird im Pulk im Mittel langsamer gefahren. Bei einer detaillierten Betrachtung ist auf dem geraden Streckenstück die mittlere Geschwindigkeit von vier der sechs Pulks geringer als die aller im Pulk beteiligten Fahrer (Pulks 2, 3, 4, 5; siehe Abbildung 21 links). Aus dem Rahmen fällt Pulk 1, da hier eine mittlere Geschwindigkeit eingeregelt wird, die noch höher ist als die des schnellsten einzelnen Fahrers. Im kurvigen Abschnitt wird dagegen meist eine Geschwindigkeit eingestellt, die in der Einzelfahrt die langsameren Probanden gefahren sind (siehe Abbildung 21 rechts).

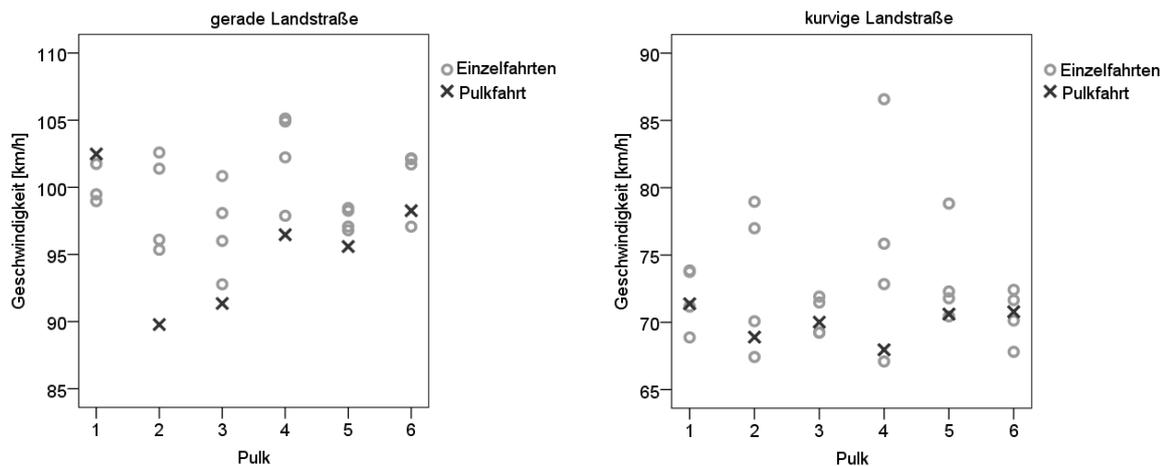


Abbildung 21: Mittlere Geschwindigkeiten der Fahrer in der Einzelfahrt und des Pulks für den geraden (links) und den kurvigen (rechts) Landstraßenabschnitt.

Mit dem langsameren Fahren im Pulk ereignen sich seltener Geschwindigkeitsüberschreitungen: Während auf der geraden Strecke einzeln im Mittel 47 % der Zeit schneller als die erlaubten 100 km/h gefahren wird, sind dies in der Pulkfahrt nur noch 32 % ($t(22) = 2.79; p = .011$; siehe Abbildung 22 links). Auch auf dem kurvigen Teilstück ist dieser Unterschied mit 61 % einzeln vs. 49 % im Pulk vorhanden ($t(23) = 2.25; p = .034$; siehe Abbildung 22 rechts).

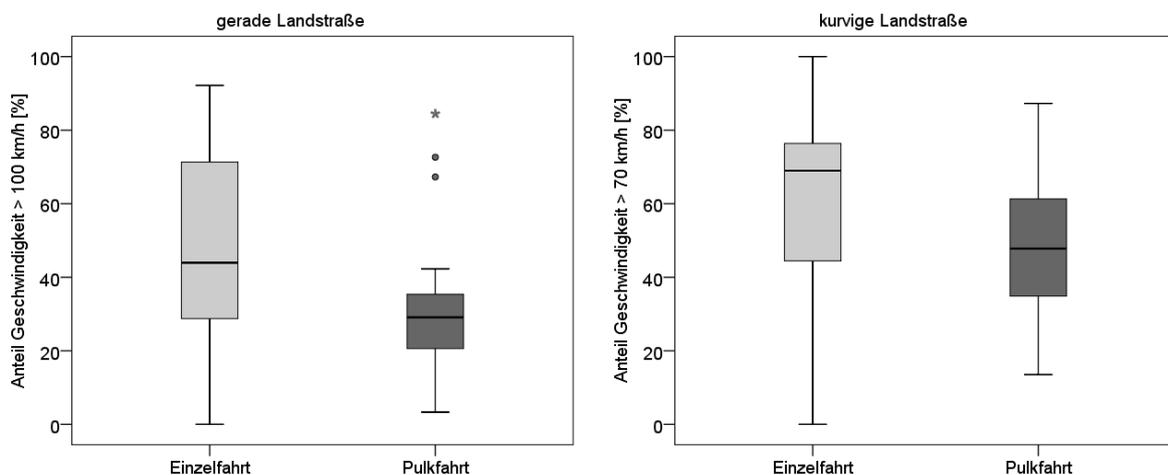


Abbildung 22: Anteil an Geschwindigkeitsübertretungen in Einzel- und Pulkfahrt für die gerade (links) und die kurvige (rechts) Landstraße. Dargestellt sind Boxplots.

Weiterhin wird deutlich, dass die Fahrer sich durch den Pulk aneinander im Fahrverhalten anpassen müssen. Dies führt zu einer geringeren interindividuellen Variabilität im Verhalten und zeigt sich insbesondere bei den Geschwindigkeitsübertretungen: In der Einzelfahrt im kurvigen Abschnitt gibt es Fahrer, die immer langsamer als 70 km/h fahren (siehe Abbildung 22 rechts). Daneben existieren Fahrer, die permanent schneller als erlaubt fahren. Im Pulk gleichen sich die Fahrer an, wodurch dieses extreme Verhalten nicht mehr auftritt.

Bezüglich der Querführung sind die Effekte der Art der Fahrt nicht konsistent für die beiden Streckenabschnitte: Während sich auf der geraden Landstraße die Standardabweichung der lateralen Position (SDLP) nicht ändert ($t(22) = 0.21$; $p = .836$; siehe Abbildung 23 links), nimmt sie auf dem kurvigen Abschnitt in der Pulkfahrt zu ($t(23) = 2.25$; $p = .035$; siehe Abbildung 23 rechts). Dies bedeutet, dass die Spurhaltung im Pulk hier schlechter wird.

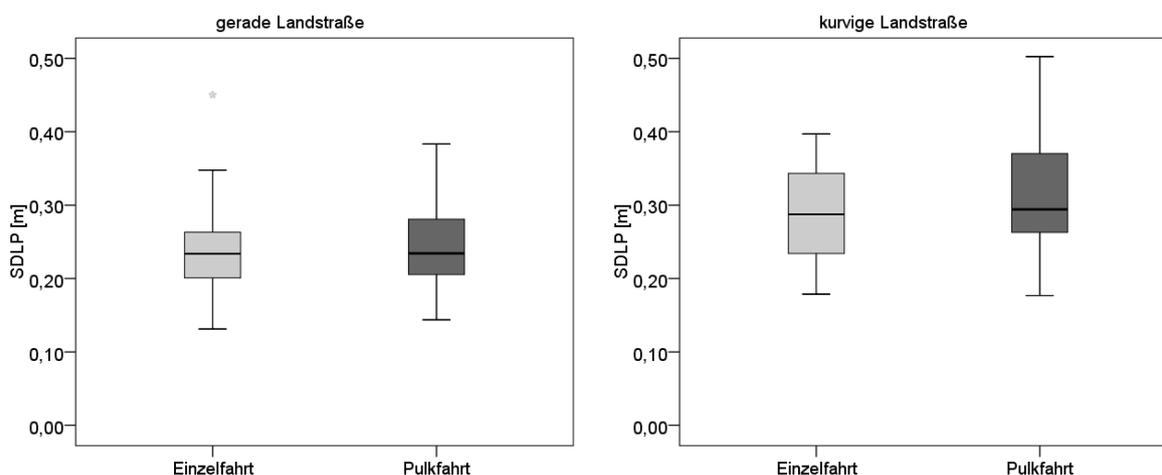


Abbildung 23: SDLP in Einzel- und Pulkfahrt für die gerade (links) und die kurvige (rechts) Landstraße. Dargestellt sind Boxplots.

Die bisher berichteten Ergebnisse zeigen, dass die Pulkfahrt vor allem zu Veränderungen der Längsführung führt. Bei der Querführung sind die Effekte dagegen nicht konsistent. Diese Ergebnisse gelten für die gesamte Stichprobe und erlauben keine Aussage darüber, ob diese Ergebnisse intraindividuell stabil sind. Hierfür sind folgende Fragen zu klären: Haben Fahrer mit einer guten Spurhaltung in der Einzelfahrt auch eine gute Spurhaltung in der Pulkfahrt? Fahren Fahrer, die einzeln oft zu schnell fahren, auch in der Pulkfahrt oft zu schnell?

Diese Fragestellungen werden mit Hilfe bivariater Pearson-Korrelationen beantwortet. Tabelle 7 zeigt, dass es in der Längsführung für verschiedene Parameter keinen bzw. nur schwache Zusammenhänge zwischen den Fahrten gibt. In der Querführung dagegen (SDLP, Spurüberschreitungen) sind die Zusammenhänge sehr hoch und von einer Nullkorrelation signifikant verschieden. Dieses Ergebnis wird auch grafisch in den Streudiagrammen für Geschwindigkeitsübertretungen (siehe Abbildung 24 oben), welche exemplarisch für die Längsführung gewählt wurden, und SDLP (siehe Abbildung 24 unten) deutlich. Während bei der SDLP die Werte der Fahrer für die gerade und kurvige Strecke relativ nahe an der Regressionsgerade liegen, ist die Verteilung bei den Geschwindigkeitsübertretungen heterogener.

Tabelle 7: Korrelationen nach Pearson zwischen ausgewählten Fahrparametern der Einzel- und Pulkfahrt für den geraden und den kurvigen Streckenabschnitt. Signifikante Korrelationen sind mit * (für ein α -Niveau von 0.05) bzw. ** (für ein α -Niveau von 0.01) gekennzeichnet.

	Gerade Landstraße	Kurvige Landstraße
mittlere Geschwindigkeit	-.076	.274
maximale Geschwindigkeit	.249	.231
Standardabweichung der Geschwindigkeit	.375	-.214
Anteil Geschwindigkeitsübertretungen	.398	.256
SDLP	.705**	.618**
Anteil an Spurüberschreitungen	.875**	.549**

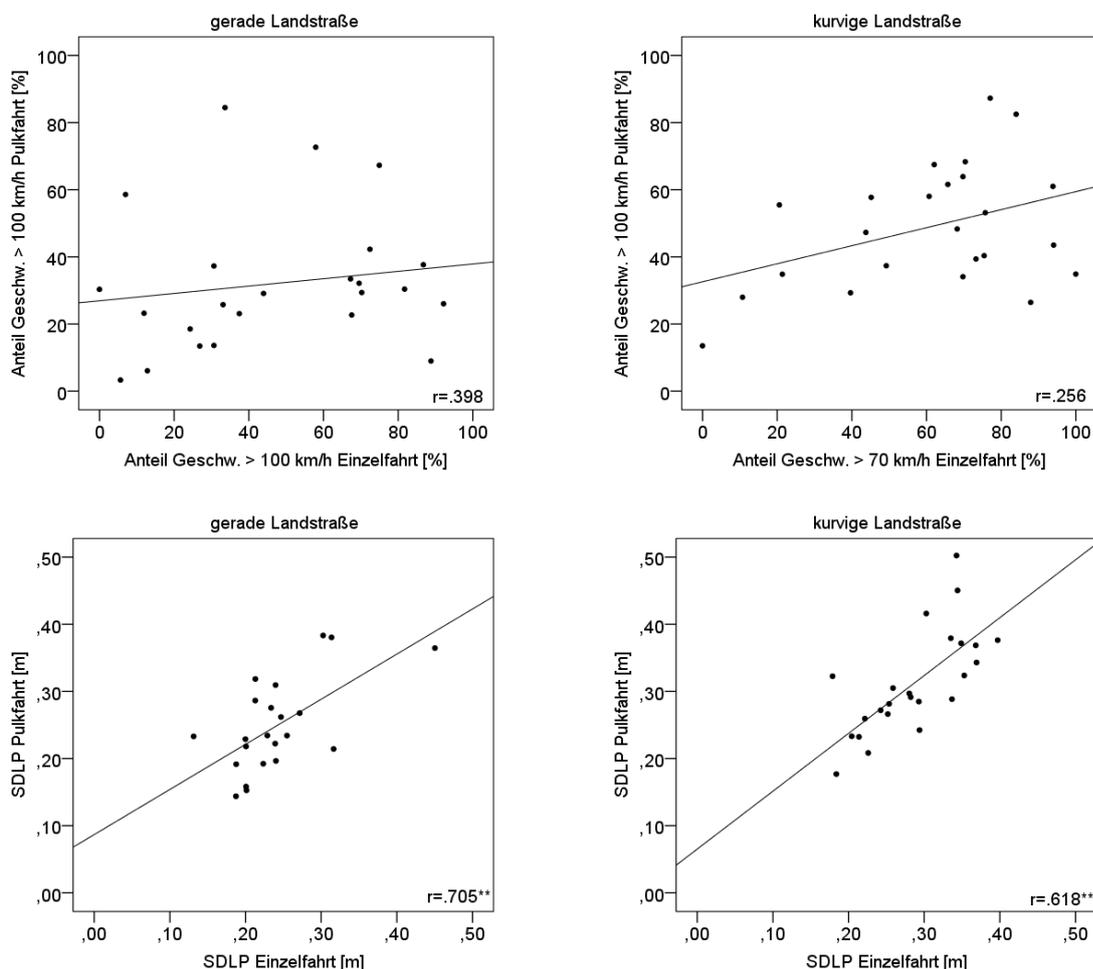


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsübertretungen (oben) bzw. SDLP (unten) für Einzel- und Pulkfahrt für die gerade (links) und die kurvige (rechts) Landstraße. Jeder Punkt stellt einen Probanden dar.

6.3.1.3 Zusammenfassung

In der Pulkfahrt beim Folgefahren müssen sich die verschiedenen Fahrer auf einen Fahrstil „einigen“. Dies führt dazu, dass insgesamt langsamer gefahren wird. Allerdings gibt es auch einige Fahrer, die in der Pulkfahrt schneller fahren und mehr Geschwindigkeitsübertretungen begehen. Die Folge ist, dass es bezüglich des Geschwindigkeitsverhaltens keine oder höchstens geringe Zusammenhänge zwischen den beiden Fahrten gibt. Wenn ein Fahrer in der Einzelfahrt eher schnell fährt, hat dies für die Pulkfahrt nur geringe Auswirkungen. Dies ist jedoch anders bei der Spurhaltung, bei der es hohe Zusammenhänge zwischen den Fahrten gibt: Wer in der Einzelfahrt eine gute Spurhaltung hat, hat dies auch in der Pulkfahrt.

Möglicherweise ist die notwendige Anpassung des eigenen Fahrverhaltens an andere Fahrer der Grund dafür, dass die Pulkfahrt in verschiedenen Dimensionen (z. B. Konzentration, Anstrengung) als beanspruchender beurteilt wird. Für die methodische Bewertung der Pulksimulation ist positiv, dass die Probanden die Fahrt mit echtem Umgebungsverkehr als realistischer bewerten.

6.3.2 Welchen Einfluss haben nachfolgende Fahrzeuge im Pulk?

Das vorige Kapitel hat gezeigt, dass sich die Fahrer im Folgefahrt-Pulk in ihrem Fahrverhalten aufeinander anpassen müssen und das Fahren im Pulk als beanspruchender bewerten. Nun stellt sich die Frage, ob dies auch für den ersten Fahrer des Pulks gilt. Falls der erste Fahrer sein Verhalten im Pulk verändert, würde dies bedeuten, dass die Verhaltenspassung nicht nur auf vorausfahrende Fahrzeuge gerichtet ist, sondern auch auf nachfolgende Fahrer. Es ist wichtig dies zu wissen, um die Ergebnisse folgender Studien besser interpretieren zu können. Um dies zu beantworten, werden ähnlich wie im vorherigen Kapitel Einzel- und Pulkfahrt verglichen. Es werden jedoch ausschließlich die Fahrer an Position 1 berücksichtigt.

Da die einzige Instruktion der Fahrer in der Pulkfahrt darin bestand, einen möglichst geringen bzw. komfortablen Abstand zu halten, war dies für den Fahrer an Position 1 überhaupt nicht relevant. Es ist damit zu erwarten, dass es für diese Fahrer keine Unterschiede zwischen den Fahrten gibt.

6.3.2.1 Subjektive Daten

Die Auswertung der Fahrtbefragung erfolgte mit Hilfe von t -Tests für abhängige Stichproben. Die Fahrt im Pulk wird von den Fahrern an erster Position als schwieriger ($t(5) = 3.78$; $p = .013$; siehe Abbildung 25) und anstrengender ($t(5) = 4.03$; $p = .010$) beurteilt. Keine Unterschiede gibt es stattdessen bei den übrigen Aspekten, z. B. bei Sicherheit ($t(5) = 1.17$; $p = .296$), Aufmerksamkeit ($t(5) = 0.61$; $p = .566$) und Spaß ($t(5) = 0.27$; $p = .797$).

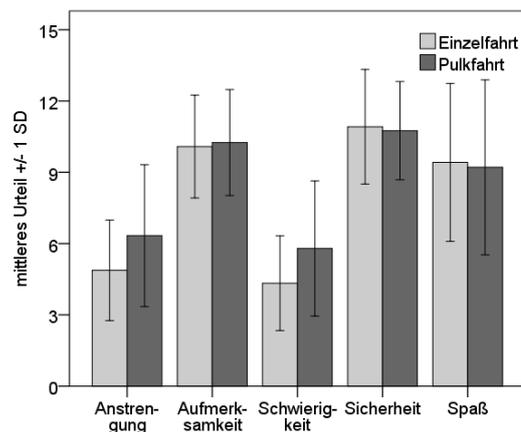


Abbildung 25: Ergebnisse ausgewählter Items der Fahrtbefragung. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

6.3.2.2 Fahrdaten

Die Auswertung der Fahrdaten wurde für dieselben Streckenabschnitte wie im vorigen Kapitel durchgeführt. Auf dem geraden Landstraßenabschnitt zeigen sich keine Unterschiede in den Parametern: Es wird mit demselben Geschwindigkeitsverhalten gefahren und auch die Querführung unterscheidet sich nicht (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Mittelwerte und Standardabweichungen diverser Parameter für die gerade Landstraßenstrecke in Einzel- und Pulkfahrt mit Ergebnissen von t -Tests für abhängige Stichproben.

Parameter	Einzelfahrt M (SD)	Pulkfahrt M (SD)	t	df	p -Wert
Mittl. Geschwindigkeit	98.85 (2.71)	98.70 (2.63)	0.12	5	.910
Max. Geschwindigkeit	107.32 (4.30)	110.20 (3.11)	1.77	5	.137
Geschwindigkeit > 100 km/h	42.22 (26.98)	40.23 (22.40)	0.14	5	.896
SD Geschwindigkeit	5.81 (2.84)	5.34 (1.30)	0.66	5	.537
SDLP	0.24 (0.05)	0.22 (0.05)	0.51	5	.634

Stattdessen führt die Pulkfahrt zu einigen Effekte beim kurvigen Streckenstück: Die Fahrer an erster Position fahren zwar genauso schnell wie in der Einzelfahrt, jedoch sind die maximalen Geschwindigkeiten geringer. Zudem wird weniger zu schnell gefahren. Dies resultiert in einem homogeneren Fahren bezüglich der Längsführung, wie die geringere Variation der Geschwindigkeit in der Pulkfahrt zeigt. Auf die Querführung hat die Fahrt im Pulk dagegen keinen Einfluss (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Mittelwerte und Standardabweichungen diverser Parameter für die kurvige Landstraßenstrecke in Einzel- und Pulkfahrt mit Ergebnissen von t-Tests für abhängige Stichproben.

Parameter	Einzelfahrt M (SD)	Pulkfahrt M (SD)	t	df	p-Wert
Mittl. Geschwindigkeit	71.15 (2.61)	69.99 (1.00)	1.21	5	.279
Max. Geschwindigkeit	96.57 (9.28)	89.17 (6.42)	5.14	5	.044
Geschwindigkeit > 70 km/h	64.67 (19.94)	49.71 (12.95)	2.02	5	.099
SD Geschwindigkeit	5.31 (1.27)	4.27 (1.25)	3.29	5	.022
SDLP	0.29 (0.07)	0.29 (0.05)	0.50	5	.639

6.3.2.3 Zusammenfassung

Für die Fahrer an erster Position macht es einen Unterschied, ob im Pulk gefahren wird oder nicht: Das Fahren im Pulk ist anstrengender und schwieriger. Weiterhin wird teilweise konstanter gefahren und Geschwindigkeitsspitzen fallen geringer aus. Diese Ergebnisse sind erstaunlich, da die ersten Fahrer im Pulk keine Vorderfahrzeuge hatten und die Instruktion lediglich für die hinteren Fahrer relevant war.

6.3.3 Welche Effekte haben Positionierungen im Pulk?

Bisher konnte gezeigt werden, dass sich Pulk- und Einzelfahrt unterscheiden und dass dies auch für den ersten Fahrer im Pulk gilt. Nun ist zu prüfen, ob die Positionen im Pulk mit spezifischen Anforderungen und Effekten einhergehen. Für die Durchführung weiterer Studien sind derartige Kenntnisse wichtig. Nur wenn diese Effekte bekannt sind, können die Ergebnisse beim Folgefahren korrekt interpretiert werden.

Daher absolvierten die Probanden alle vier Landstraßenstrecken zum Folgefahren jeweils in veränderter Reihenfolge: Jeder Fahrer fuhr somit einmal an jeder der vier Positionen. Die Abstandsinstruktion war in diesen Fahrten „halben Tacho einhalten“.

Nach jeder Fahrt wurden Fragebögen zur Beurteilung dieser Fahrt vorgelegt. Sie thematisierten verschiedene Aspekte des Fahrens und sollten anhand der 16-stufigen Kategorienunterteilungsskala (siehe Kapitel 5.2.5) beantwortet werden.

6.3.3.1 Subjektive Daten

Die vier Positionen werden von den Fahrern in den meisten Aspekten nicht unterschiedlich beurteilt (siehe Abbildung 26): nach den Urteilen sind Fahrten auf den verschiedenen Positionen gleich anstrengend ($F(3, 39) = 1.38$; $p = .264$; $\eta^2 = .10$), schwierig ($F(3, 39) = 1.81$; $p = .161$; $\eta^2 = .12$) und sicher ($F(3, 39) = 1.51$; $p = .227$; $\eta^2 = .10$). Zudem ist die Aufmerksamkeit gleich hoch ($F(3, 39) = 1.39$; $p = .261$; $\eta^2 = .10$) und die Fahrten machen genauso viel Spaß ($F(3, 39) = 1.99$; $p = .131$; $\eta^2 = .13$).

Unterschiedlich fällt dagegen die wahrgenommene Beeinflussung durch die anderen Fahrer des Pulks aus: Auf der ersten Position wird die Beeinflussung des Fahrens durch die anderen drei Fahrer geringer bewertet als auf den hinteren Positionen ($F(3, 39) = 17.46; p < .001; \eta^2 = .57$).

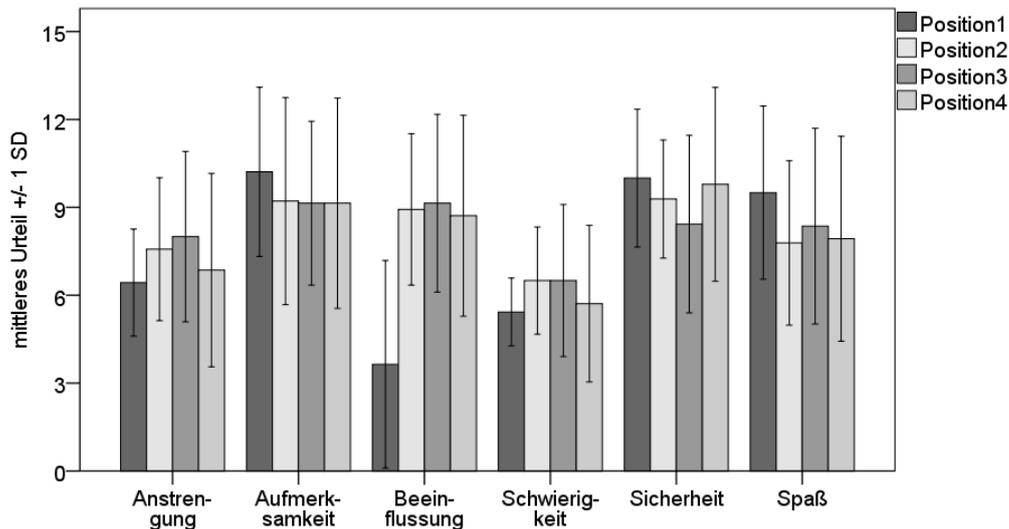


Abbildung 26: Ergebnisse ausgewählter Items der Fahrtbefragung. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Vergleichen die Fahrer die Positionen direkt und bringen diese in eine Rangreihe bezüglich der Anstrengung, wird Position 1 als am wenigsten anstrengend beurteilt (Friedman-Test: $\chi^2(3) = 7.80; p = .050$). Insbesondere die mittleren Positionen 2 und 3 werden als anstrengender bewertet (siehe Abbildung 27).

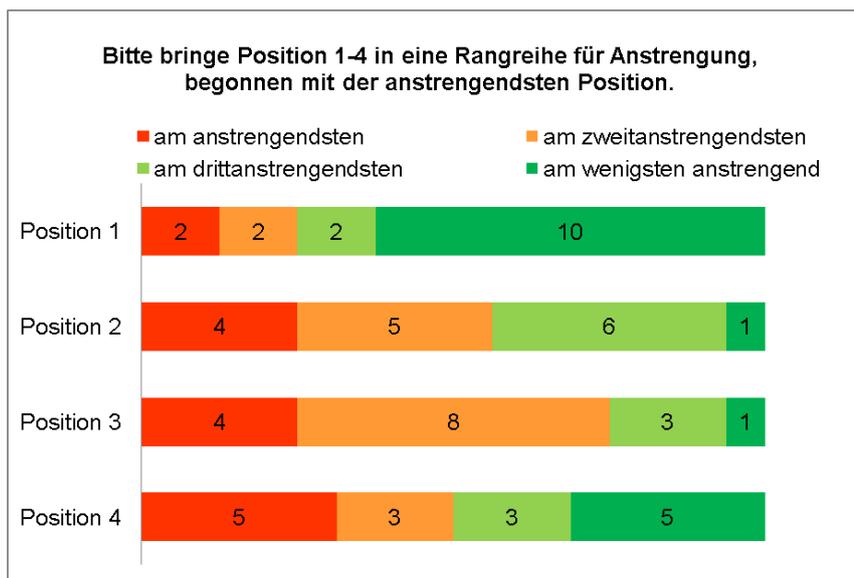


Abbildung 27: Häufigkeiten für die Beurteilung der Positionen hinsichtlich ihrer Anstrengung.

6.3.3.2 Fahrdaten

In diesem Kapitel werden die einzelnen Positionen des Pulks bei der Folgefahrt und bei ausgewählten Situationen betrachtet. Bei der Folgefahrt wurde ein 2.0 km langer gerader und übersichtlicher Abschnitt auf der Landstraße gewählt. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit betrug 100 km/h. Es gab keine Situationen wie scharfe Kurven, Kuppen oder Hindernisse, die ein Abbremsen notwendig gemacht hätten.

Mit den Situationen „Pannenfahrzeug“ und „Kiste“ wurden zwei potentiell sicherheitskritische Szenarien ausgewählt, für deren Untersuchung die Fahrsimulation allgemein prädestiniert ist. Das „Pannenfahrzeug“ erfordert aufgrund der späten Einsehbarkeit eine stärkere Bremsreaktion, um eine Kollision zu vermeiden. Ein Ausweichmanöver ist aufgrund des Gegenverkehrs nicht möglich. Bei der „Kiste“ gibt es keinen Gegenverkehr, allerdings ist das Hindernis aufgrund der Kuppe erst sehr spät erkennbar. Somit ist hier ein Ausweichen notwendig.

Folgefahrt

Die Probanden fahren mit zunehmend hinterer Positionierung im Pulk weniger konstant (siehe Abbildung 28 links). Auf Position 1 liegt die Geschwindigkeit durchschnittlich 83 % der Zeit zwischen 90 und 100 km/h. Dieser Wert nimmt bis zu Position 4 stetig ab (Pos. 2: 73 %; Pos. 3: 71 %; Pos. 4: 66 %; $F(3, 45) = 5.32$; $p = .003$; $\eta^2 = .26$). In den hinteren Positionen wird vermehrt langsamer als 90 km/h gefahren ($F(3, 45) = 8.14$; $p < .001$; $\eta^2 = .35$). Bei schnelleren Geschwindigkeiten unterscheiden sich die Positionen dagegen nicht signifikant ($F(3, 45) = 1.85$; $p = .152$; $\eta^2 = .11$).

Betrachtet man einzelne Kenngrößen der Geschwindigkeitsverteilung genauer, unterscheiden sich die Werte am Ende der Verteilung (siehe Abbildung 28 rechts): Sowohl Minima ($F(3, 45) = 7.71$; $p < .001$; $\eta^2 = .34$) als auch Maxima ($F(3, 45) = 7.34$; $p < .001$; $\eta^2 = .33$) der Geschwindigkeiten sind im hinteren Teil des Pulks extremer ausgeprägt als an der ersten Position, auf welcher der vordere Fahrer recht konstant fährt. Da der Pulk jedoch zusammenbleiben muss, sind die Mediane der Positionen vergleichbar ($F(3, 45) = 0.28$; $p = .839$; $\eta^2 = .02$).

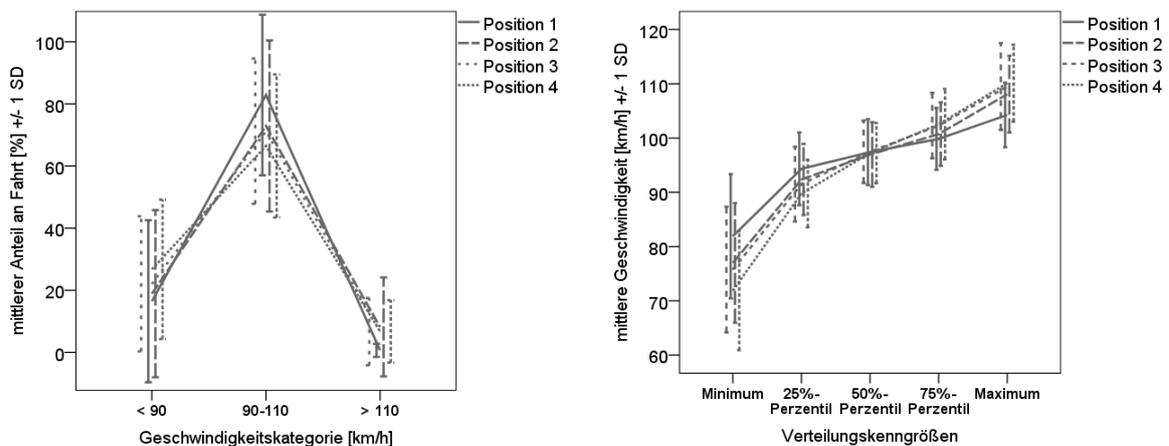


Abbildung 28: Fahrtanteile der Geschwindigkeitskategorien pro Position (links). Verteilungskenngrößen für Geschwindigkeit der Positionen (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Zur Erklärung dieses sogenannten Ziehharmonika-Effekts ist in Abbildung 29 der Geschwindigkeitsverlauf eines Pulks über einen Streckenabschnitt exemplarisch dargestellt. Zunächst verzögert Fahrer 1 auf etwa 92 km/h. Die folgenden Fahrer bremsen sukzessive stärker ab. Dieses Aufschaukeln der Bremsreaktion führt dazu, dass die hinteren Fahrer nach der Bremsung wieder stärker Beschleunigen müssen, um nicht den Anschluss zu verlieren.

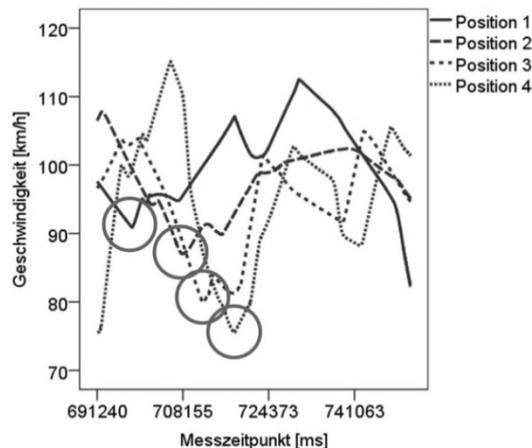


Abbildung 29: Geschwindigkeitsverlauf der vier Fahrer eines Pulks. Eingekreist sind die Geschwindigkeitsminima nach der Bremsreaktion des Führungsfahrzeugs.

Diese stärkeren Bremsungen wären nicht notwendig gewesen, um eine Kollision zu vermeiden. So liegen die minimalen Time-Headways in dieser Situation bei etwa einer Sekunde und mit dem Beschleunigen des Führungsfahrzeugs steigt der Time-Headway sofort wieder an (siehe Abbildung 30). Trotzdem bremsen die nachfolgenden Fahrzeuge weiterhin ab und es dauert in diesem Fallbeispiel zwischen vier und zehn Sekunden, bis wieder beschleunigt wird.

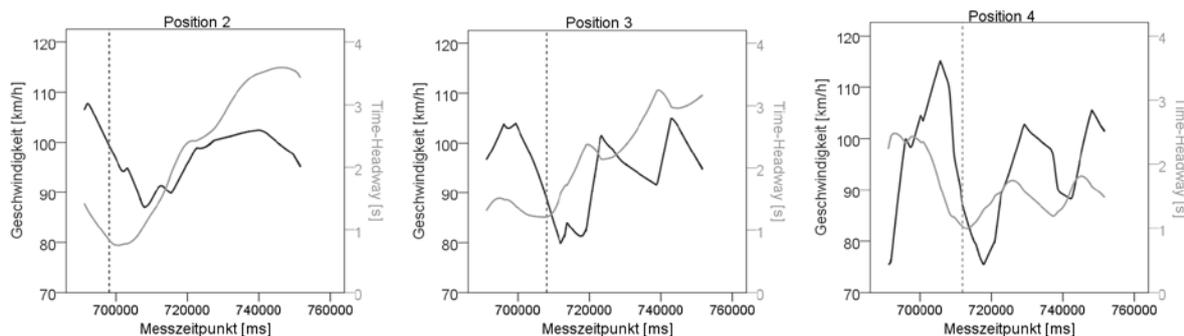


Abbildung 30: Verläufe von Geschwindigkeit und Time-Headway der Positionen 2, 3 und 4 für die in Abbildung 29 dargestellte Fahrersituation. Die vertikale gestrichelte Linie kennzeichnet den Zeitpunkt der minimalen Geschwindigkeit des jeweiligen vorausfahrenden Fahrzeugs.

Ob die Positionierungseffekte auch mit Veränderungen im Abstandsverhalten einhergehen, wird nun geprüft. Hierzu wurde die Gesamtstrecke als Grundlage gewählt, da der verwendete Abstandsparameter Time-Headway geschwindigkeitsunabhängig ist. Es zeigt sich, dass die Position auf diverse Abstandsmaße (Mittelwert, Median, Minimum und Standardabweichung des Time-Headway) keinen Einfluss (siehe Tabelle 10) hat. Somit ist das Abstandsverhalten für alle Positionen mit einem Führungsfahrzeug vergleichbar.

Tabelle 10: Mittelwerte und Standardabweichungen für diverse Parameter des Time-Headway (THW) für die Positionen 2, 3 und 4 mit Ergebnissen von Varianzanalysen mit Messwiederholung.

Parameter	Position 2 M (SD)	Position 3 M (SD)	Position 4 M (SD)	F	df	p-Wert
Mittlerer THW	1.95 (0.30)	2.12 (0.33)	1.99 (0.65)	1.20	2; 30	.317
Median THW	1.86 (0.31)	2.03 (0.35)	1.86 (0.60)	1.50	2; 30	.239
Minimaler THW	0.42 (0.27)	0.57 (0.25)	0.44 (0.23)	1.77	2; 30	.188
SD THW	0.68 (0.17)	0.79 (0.22)	0.78 (0.31)	1.77	2; 30	.188

Pannenfahrzeug

Die Sicherheitskritikalität der Situation „Pannenfahrzeug“ kennzeichnet die Time-to-collision (TTC) bei Bremsbeginn des Ego-Fahrers. Ist die TTC klein, wird später gebremst und die Situation kritischer.

Zunächst fällt die Ungleichheit der Streuungen auf, die mit zunehmender Positionierung ansteigt (Levene-Test: $F(3, 44) = 3.80$; $p = .017$; siehe Abbildung 31 links). Im Vergleich der Positionen unterscheiden sich die TTCs nicht und somit ist die Situation für die vier Positionen im Mittel vergleichbar kritisch (Kruskal-Wallis-Test: $\chi^2(3) = 1.37$; $p = .713$). Allerdings gibt es auf den Positionen 2, 3 und 4 einzelne Fahrer, bei denen die Fahrsituation nicht kritisch war, wenn man den von van der Horst (1991) vorgeschlagenen Wert von 4 s als Untergrenze für eine sichere Bremsung heranzieht. Auf Position 1 dagegen erlebte jeder Fahrer eine sicherheitskritische Situation unter dieser Definition.

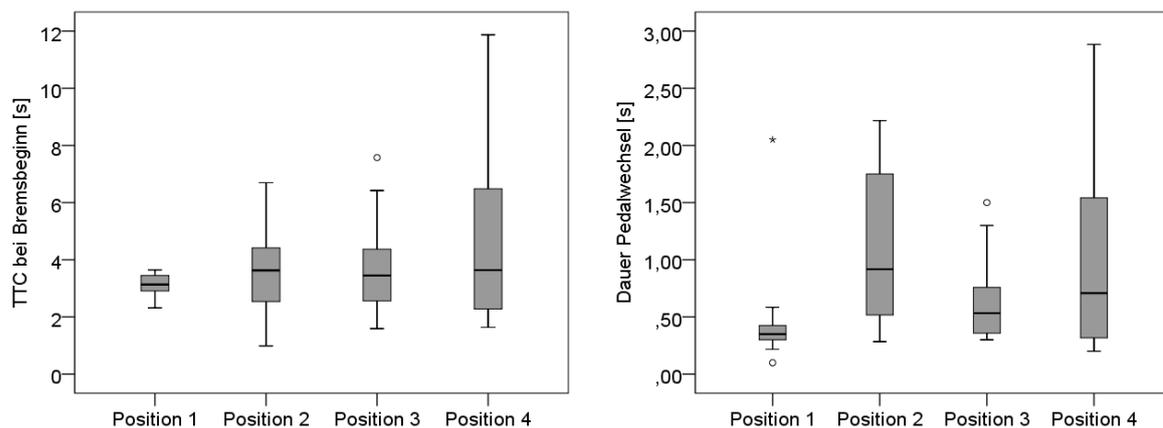


Abbildung 31: TTC bei Bremsbeginn (links) und Dauer zum Pedalwechsel (rechts) für die Fahrer der vier Positionen in der Situation „Pannenfahrzeug“. Dargestellt sind Boxplots.

Ähnlich sieht das Ergebnis beim Vergleich der Dauer zum Pedalwechsel aus⁴. Auch hier ist die Varianz beim ersten Fahrer kleiner als auf den hinteren Positionen (Levene-Test: $F(3, 41) = 3.08$; $p = .038$; siehe Abbildung 31 rechts). Weiterhin besteht die Tendenz, dass die hinteren Fahrer mehr Zeit zum Pedalwechsel haben (Kruskal-Wallis-Test: $\chi^2(3) = 6.52$; $p = .089$). Die Erklärung für die steigenden Varianzen in den hinteren Positionen liegt in der unterschiedlichen Kontrollierbarkeit der Situation: Der erste Fahrer muss unmittelbar auf das Hindernis bremsen, was die Versuchssituation stark kontrolliert. Bei den hinteren Fahrern dagegen befinden sich andere Fahrzeuge dazwischen, welche mit unterschiedlichen Stärken und zu verschiedenen Zeitpunkten auf das Hindernis bzw. ihr jeweiliges Führungsfahrzeug bremsen. Darüber hinaus sind die Abstände zwischen den Fahrzeugen des Pulks nicht konstant. Dies gestaltet die Situation für die letzten Fahrer zunehmend variabel.

Bezüglich der Fahrerurteile direkt im Anschluss an die Situation zeigen sich keine Unterschiede zwischen den Positionen. Alle Fahrer bewerteten die Situation als gleich überraschend ($F(3, 44) = 0.37$; $p = .776$; $\eta^2 = .03$; siehe Abbildung 32).

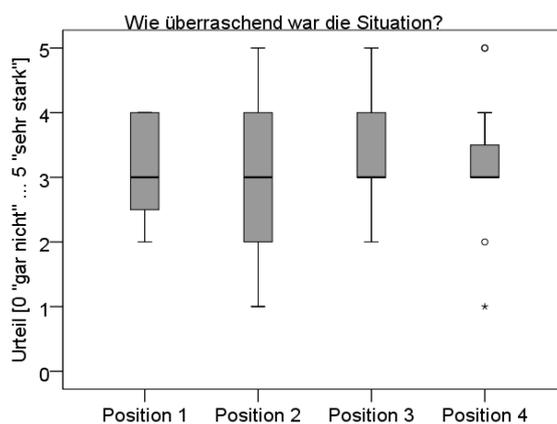


Abbildung 32: Urteile der Fahrer pro Position zu Überraschung in der Situation „Pannenfahrzeug“. Dargestellt sind Boxplots.

Kiste

Diese unerwartete Situation erfordert ein Ausweichmanöver, um nicht mit dem Hindernis zu kollidieren. Dies gelang allen Fahrern, jedoch bremste jeder Fahrer vor dem Ausweichen zusätzlich ab. Abbildung 33 stellt den Verlauf dieses Manövers für alle vier Positionen dar⁵. Den einzigen Unterschied zwischen den vier Positionen gibt es im Punkt des ersten Bremsens. Je weiter hinten im Pulk gefahren wird, umso früher wird vor dem Hindernis gebremst. Die Zeitpunkte für Blinken, Lenkbewegung und Spurwechsel unterscheiden sich dagegen nicht.

⁴ Drei Ausreißerwerte wurden aus der Auswertung genommen, da die Dauern > 4 s betragen und das Gaspedal schon vor Erkennen des Hindernisses verlassen wurde. Daher ist eine Reaktion auf das Pannenfahrzeug bei diesen Fahrern auszuschließen.

⁵ Position 4 war nur fünfmal besetzt, da in drei Fällen der Abstand zu den übrigen Fahrern zu groß war.

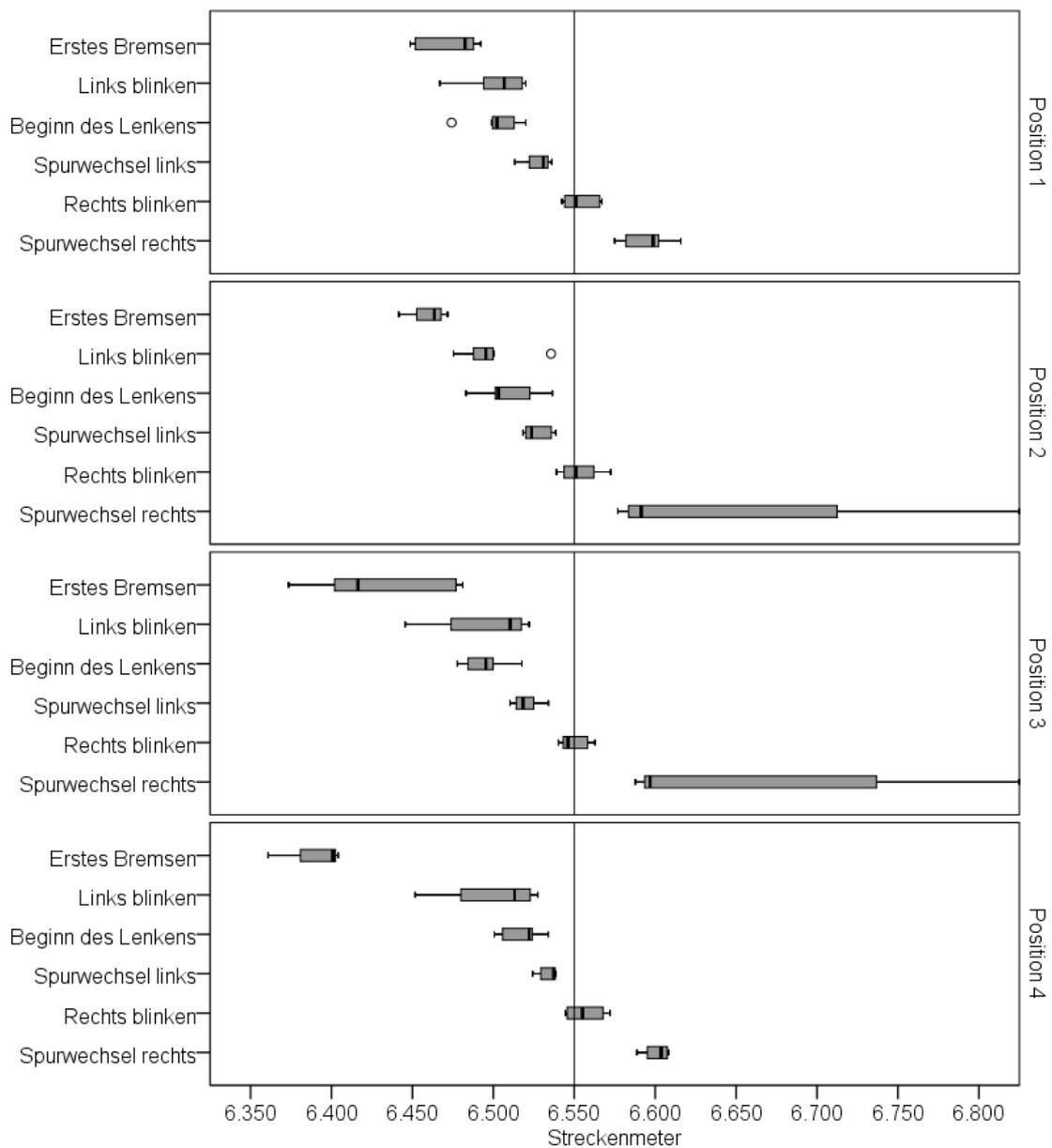


Abbildung 33: Verlauf des Manövers „Kiste“ über den Streckenmeter für die vier Positionen. Auf Streckenmeter 6550 befand sich das Hindernis. Dargestellt sind Boxplots.

Ein Ziehharmonika-Effekt aufgrund der Bremsung ist in dieser Situation nicht zu beobachten. Im Gegenteil – die Fahrer auf der vierten Position müssen weniger stark abbremsen, sodass die minimalen Geschwindigkeiten in der Situation sogar höher sind (Friedman-Test: $\chi^2(3) = 7.08$; $p = .069$; siehe Abbildung 34 links). Auf die Überraschung der Fahrer hat dies allerdings keinen Einfluss: Die Fahrer aller Positionen geben an, gleichermaßen überrascht gewesen zu sein (Friedman-Test: $\chi^2(3) = 3.01$; $p = .391$; siehe Abbildung 34 rechts).

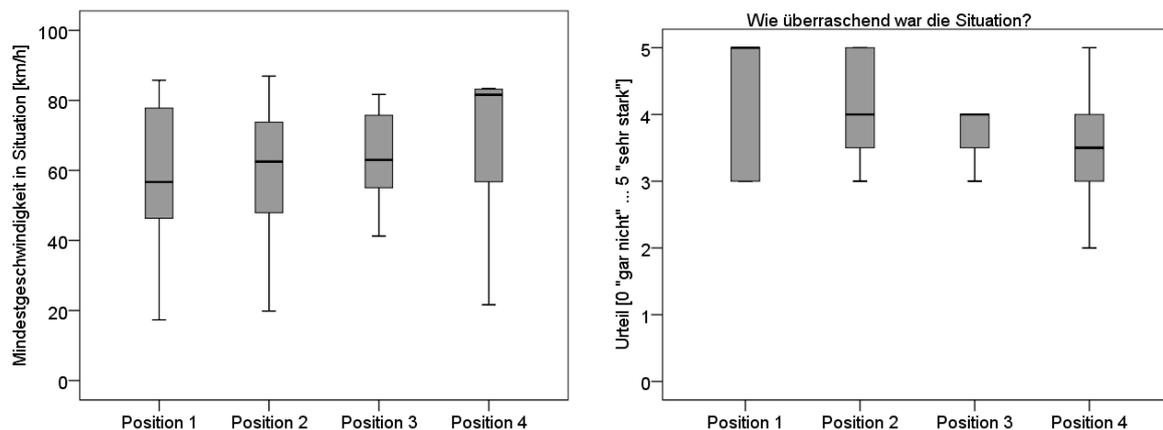


Abbildung 34: Mindestgeschwindigkeit in der Situation „Kiste“ (links) und Urteile zu Überraschung in der Situation (rechts) für die Fahrer der vier Positionen. Dargestellt sind Boxplots.

6.3.3.3 Zusammenfassung

Beim Folgefahren fällt zunächst der Ziehharmonika-Effekt auf: Weiter hinten fahrende Fahrzeuge bremsen stärker und benötigen höhere maximale Geschwindigkeiten, um den Anschluss an den Pulk nicht zu verlieren. Auf das Abstandsverhalten im Pulk hat die Positionierung dagegen keinen Einfluss. Die Abstände sind für alle Fahrzeuge vergleichbar.

Neben dem Folgefahren wurden mit dem „Pannenfahrzeug“ und der „Kiste“ zwei sicherheitskritische Situationen detailliert betrachtet. Beim Pannenfahrzeug reagierten die Fahrer an Position 1 relativ ähnlich, da sie die Situation gleich erleben. Diese Position ist somit mit einer Einzelfahrsimulation vergleichbar. Je weiter dahinter die anderen Fahrer folgen, desto unterschiedlicher fällt ihre Reaktion aus, da sie wiederum auf die Reaktionen ihrer jeweiligen Vorderfahrzeuge reagieren. Abstände oder Geschwindigkeiten können nicht für diese Fahrer kontrolliert werden. Somit sinkt mit zunehmender hinterer Positionierung im Pulk die Vergleichbarkeit der Situation. In der Situation „Kiste“ müssen die hinteren Fahrer im Pulk ihre Geschwindigkeit weniger stark verringern als die vorderen Fahrer. Dies könnte ein Anzeichen dafür sein, dass sie von den vorderen Fahrern profitieren und die Situation früher erkennen. Allerdings beurteilen alle Fahrer die Situation vergleichbar.

6.3.4 Wie unterscheiden sich reale Fahrer und Modelle im Pulk?

Bisher wurde für Untersuchungen zu Verkehrsabläufen häufig die Verkehrssimulation herangezogen, die ausschließlich Fahrermodelle beinhaltet. Mit der Pulksimulation existiert nun die Möglichkeit, diese Fragestellungen mit realen Fahrern zu bearbeiten. Daher wird in diesem Abschnitt ein Vergleich zwischen einem Pulk aus Fahrermodellen und einem Pulk aus realen Fahrern vorgenommen, um den Mehrwert realer Fahrer aufzuzeigen.

Hierzu wurde Strecke A einmalig von vier Fahrermodellen befahren. Diese bestanden aus denselben Modellen, die üblicherweise in den Fahrsimulationsversuchen des WIVW den simulierten Umgebungsverkehr realisieren. Die Fahrermodelle basieren, abgesehen von geringen

Änderungen, auf dem psycho-physischen Folgemodell von Wiedemann (1974). Sie wurden jeweils mit einer spezifischen Wunschgeschwindigkeit ausgestattet, die im Pulk sukzessive anstieg (Position 1: 101.5 km/h; Position 2: 108.7 km/h; Position 3: 115.9 km/h; Position 4: 125.75). Durch diese Maßnahme konnte gewährleistet werden, dass der Pulk ähnlich wie bei den realen Fahrern stets zusammenblieb und nicht zerriss. Der gewünschte Folgeabstand der Modelle wurde auf 1.5 s plus 2 m (da es im Stand keinen Sekundenabstand gibt) festgelegt.

Im Vergleich dazu befuhren vier Fahrerpulks mit je vier Probanden dieselbe Strecke. Anhand eines Streckensegments wird untersucht, inwiefern sich Modelle und reale Fahrer unterscheiden. Hierzu wird ein Landstraßenabschnitt verwendet, auf dem zunächst 100 km/h und später 70 km/h gefahren werden durfte. Etwa zur Hälfte musste der Pulk ein langsamer fahrendes simuliertes Fahrzeug überholen.

Betrachtet man zunächst die Geschwindigkeitsverläufe (siehe Abbildung 35), fällt auf, dass drei der vier Probandenpulks vor dem Überholen des simulierten Fahrzeugs ihre Geschwindigkeit verringern. Einer der Pulks bremsst dagegen nicht ab, ebenso wie der simulierte Pulk.

Die Geschwindigkeiten der simulierten Fahrzeuge variieren meist sägezahnartig um einen Wert. Dieses Verhalten ist für Wiedemann-Fahrermodelle charakteristisch. Die gewählte Geschwindigkeit entspricht nicht exakt der vorher definierten Wunschgeschwindigkeit, da das Schätzvermögen der Modelle nicht perfekt ist (wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben ist Schätzvermögen einer der psychischen Einflussfaktoren auf das Fahrerverhalten im Wiedemann-Modell). Größere Geschwindigkeitsschwankungen wie bei den realen Fahrern ereignen sich kaum. Vor allem das Modell an erster Position fährt mit äußerst konstanter Geschwindigkeit. Ähnlich wie in der Realität sind die Geschwindigkeitsschwankungen bei den folgenden Fahrern höher, jedoch zeigt sich kein deutlicher Ziehharmonika-Effekt.

Die gleichmäßige Fahrweise der Modelle hat einen erheblichen Einfluss auf die Längsbeschleunigungen (siehe Abbildung 36). Diese erreichen maximal 1.2 m/s^2 und bei Bremsungen überschreiten die Verzögerungen nur selten -1 m/s^2 . Reale Fahrer dagegen zeigen ein variables Beschleunigungsverhalten. Insbesondere beim Bremsen erreichen die Verzögerungen höhere Werte. Bei stärkeren Abbremsungen zeigt sich bei einigen Realfahrern der charakteristische Ziehharmonika-Effekt, da die Verzögerungen mit zunehmender Positionierung stärker ausfallen (z. B. Pulk 4). Bei den Modellen ist dieser Effekt dagegen nicht zu beobachten.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich von realen mit simulierten Pulkfahrten, dass die Fahrermodelle nicht die Realität abbilden können. Stattdessen verhalten sich Fahrermodelle gemäß ihrer Programmierung, in welcher Besonderheiten wie z. B. der Ziehharmonika-Effekt bisher nur eingeschränkt berücksichtigt wurden.

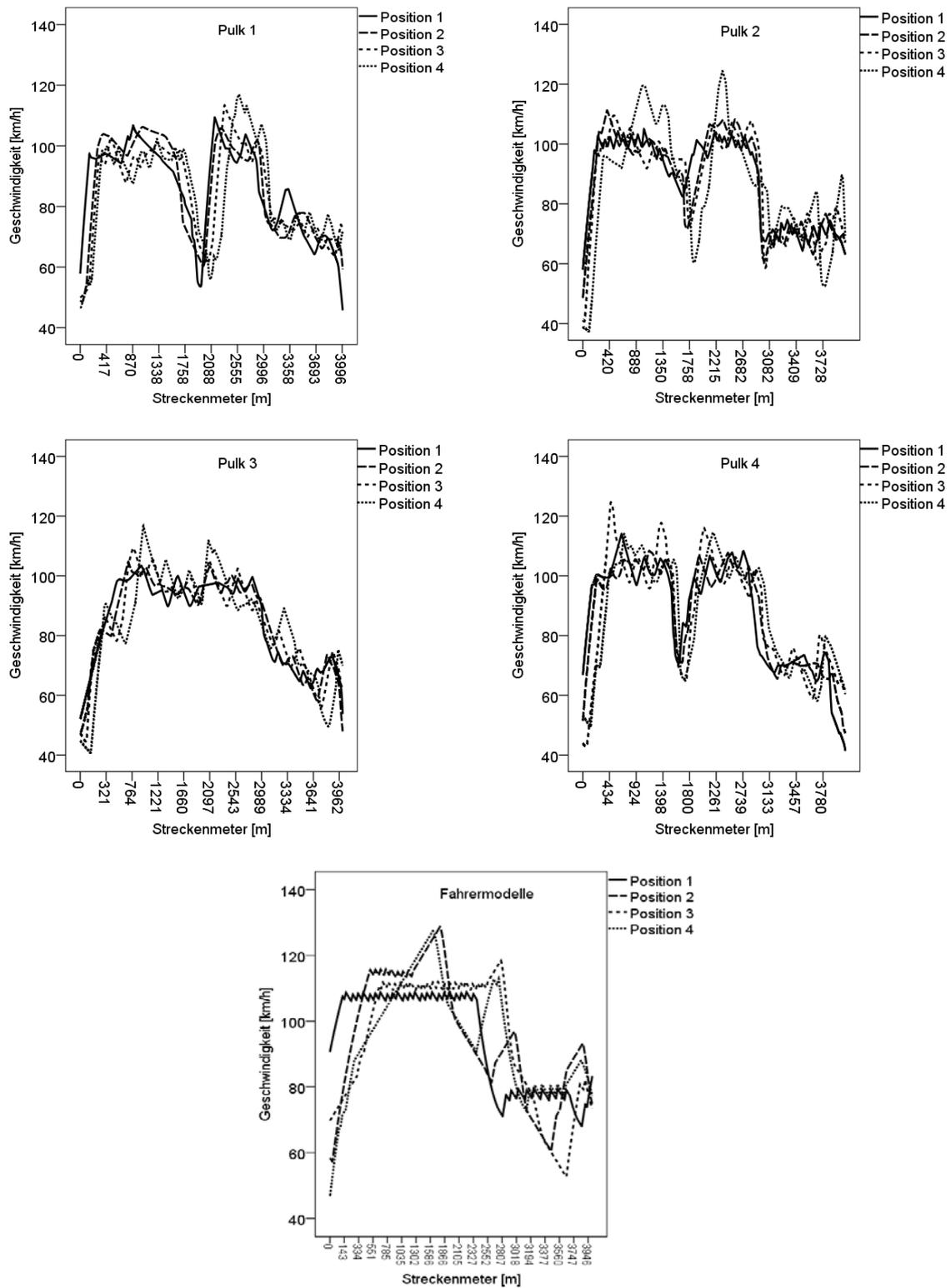


Abbildung 35: Geschwindigkeitsverläufe der vier Pulkas mit realen Fahrern (oben und Mitte) sowie der Fahrt mit Fahrermodellen (unten) für denselben Streckenabschnitt.

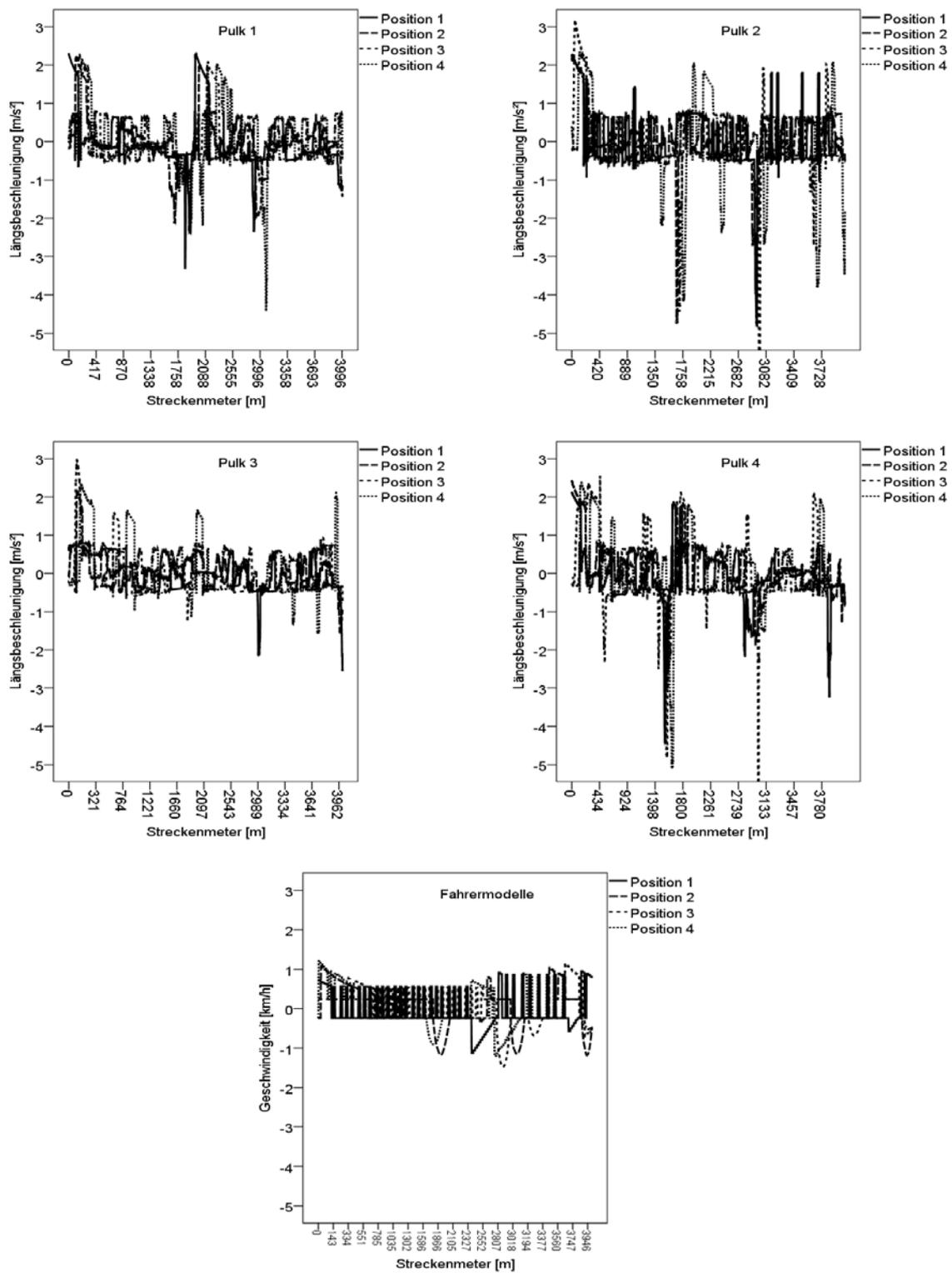


Abbildung 36: Längsbeschleunigungsverläufe der vier Pulks mit realen Fahrern (oben und Mitte) sowie der Fahrt mit Fahrermodellen (unten) für denselben Streckenabschnitt.

6.3.5 Wie wirkt sich die Einführung einer Nebenaufgabe auf den Pulk aus?

Aufgrund des zunehmenden Vorhandenseins von Informations- und Unterhaltungsmedien (z. B. Navigationssysteme, MP3-Player, Mobiltelefone) im Fahrzeug untersuchen Verkehrswissenschaftler die Auswirkungen visueller und kognitiver Nebenaufgaben während des Fahrens. Während die Befunde für visuelle Ablenkung recht stabil sind, sind die Ergebnisse für kognitive Ablenkung nicht immer eindeutig. Insbesondere bezüglich der Querführung sind die Ergebnisse inkonsistent. Während einige Autoren negative oder gar keine Einflüsse von kognitiver Beanspruchung auf die Spurhaltung berichten (z. B. Alm & Nilsson, 1995; Lamble, Kauranen, Laakso, & Summala, 1999; Strayer & Johnston, 2001), können andere Studien diesbezüglich einen positiven Effekt zeigen (z. B. Brookhuis, de Vries, & de Waard, 1991; Engström et al., 2005; Horrey & Simons, 2007). Für diesen positiven Effekt werden verschiedene Erklärungen diskutiert:

- (1) Mit kognitiver Beanspruchung blicken Fahrer häufiger in die Fahrbahnmitte und seltener in die Peripherie (z. B. Harbluk, Noy, Trbovich, & Eizenman, 2007). Victor (2005) nimmt an, dass dieses geänderte Blickverhalten in verbesserter Spurhaltung resultiert.
- (2) Nach Törnros und Bolling (2005) setzen Fahrer einen „virtual safety margin“ nach links und rechts, in welchem sie das Fahrzeug halten möchten. Mit zunehmender Beanspruchung verschiebt sich diese Begrenzung näher an das eigene Fahrzeug, was in verbesserter Spurhaltung resultiert.
- (3) Brookhuis et al. (1991) nehmen an, dass eine Aufmerksamkeitssteigerung unter kognitiver Beanspruchung ursächlich für die positiven Effekten ist.

Viele der Studien, die eine verbesserte Spurhaltung unter kognitiven Nebenaufgabenbedingungen zeigen, setzten ein Folgefahrparadigma ein, um zusätzlich Reaktionszeiten auf unerwartete Bremsungen eines Vorderfahrzeugs zu messen (z. B. Jamson & Merat, 2005; Liang & Lee, 2010). Es ist möglich, dass die Effekte der Nebenaufgabe durch diese Folgefahrtsituation begünstigt werden, da nach Salvucci und Gray (2004) vorausfahrende Fahrzeuge als eine externe Referenz für die Querführung herangezogen werden können.

Um diese Annahme zu prüfen, wurde das Fahren mit kognitiver Beanspruchung unter verschiedenen Folgefahrbedingungen (ohne vs. mit ein/zwei/drei Führungsfahrzeugen) untersucht. Hierzu befuhren die Fahrer Strecke C einmal mit und einmal ohne Nebenaufgabe, wobei die Positionierung der Fahrer im Pulk konstant gehalten wurde. Beide Fahrten erfolgten in permutierter Reihenfolge.

Es wird angenommen, dass die Nebenaufgabe zu einer Verbesserung der Spurhaltung beiträgt. Weiterhin wird erwartet, dass die positiven Effekte der Nebenaufgabe von der Position im Pulk beeinflusst werden: Während die Gewinne an erster Position ohne Führungsfahrzeug kleiner sein sollten, sollten sie mit zunehmender Positionierung bzw. Anzahl an Führungsfahrzeugen ansteigen.

6.3.5.1 Subjektive Daten

Die Einführung der Nebenaufgabe beim Fahren führt bei den Fahrern zu einer höheren Beanspruchung: Die Fahrt wird als anstrengender ($t(15) = 6.11, p < .001$) beurteilt. Weiterhin ist die Fahrt mit Nebenaufgabe laut den Fahrern schwieriger ($t(15) = 7.16, p < .001$) und weniger sicher ($t(15) = 3.09, p = .007$). Zudem geben die Fahrer an, dass die Fahrt mit Nebenaufgabe mehr Spaß ($t(15) = 2.13, p = .050$) gemacht hätte (siehe Abbildung 37).

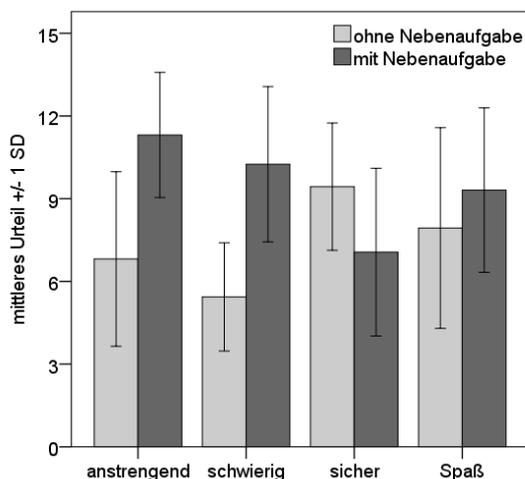


Abbildung 37: Mittlere Fahrerurteile in der Fahrtbefragung. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Auch auf die offene Frage, ob in der Fahrt mit Nebenaufgabe anders gefahren wurde als ohne diese zusätzliche Aufgabe, wird Fahren mit Nebenaufgabe als negativer bewertet. Insgesamt berichten elf der 16 Fahrer von einer veränderten bzw. geringeren Aufmerksamkeit für das Fahren, wie beispielsweise:

- „[Mit Nebenaufgabe] Orientierung praktisch ausschließlich an Führungsfahrzeug“
- „Habe [mit Nebenaufgabe] von der Fahraufgabe kaum etwas bewusst wahrgenommen, sondern bin dem Vorderfahrzeug automatisch gefolgt“
- „Ich hab von der Fahrt [mit Nebenaufgabe] gar nicht viel mitbekommen vor lauter Zählen“
- „[Mit Nebenaufgabe] sehr viel unaufmerksamer, mehr auf das Zählen als auf das Fahren konzentriert“

Betrachtet man die einzelnen Positionen im Pulk deskriptiv, so sind in den Urteilen keine deutlichen Unterschiede zwischen den Positionen festzustellen. Exemplarisch sind die Ergebnisse der Urteile zu Anstrengung (Abbildung 38 links) und Schwierigkeit (Abbildung 38 rechts) dargestellt. In der offenen Frage erwähnten zwei der zwölf Fahrer auf den Positionen zwei bis vier eine verstärkte Lenkung der Aufmerksamkeit auf das Vorderfahrzeug. Diese Aussagen sind in den obigen Beispielen aufgeführt.

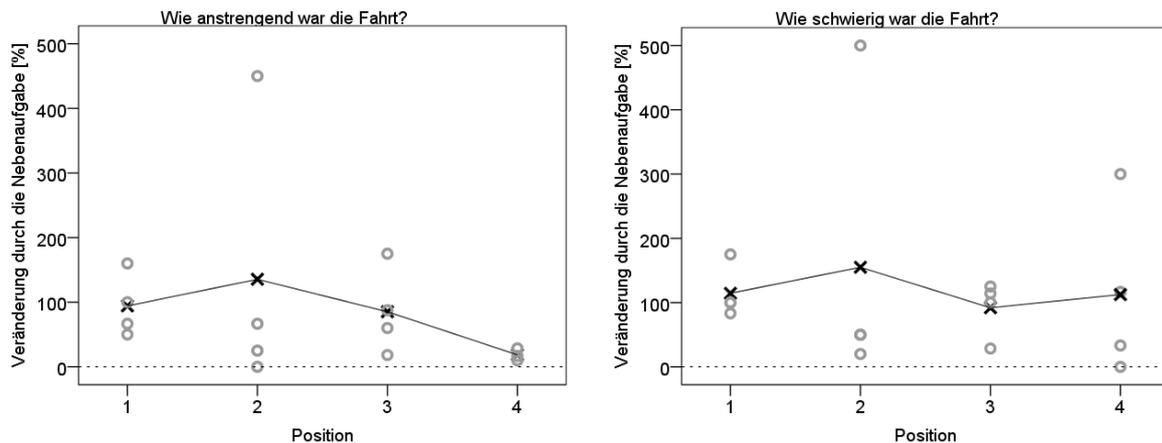


Abbildung 38: Prozentuale Veränderungen des Urteils zwischen den Fahrten ohne und mit Nebenaufgabe für Anstrengung (links) und Schwierigkeit (rechts). Positive Werte bedeuten, dass das Urteil mit Nebenaufgabe höher ausfällt. Die Werte der einzelnen Fahrer sind als Kreise, die Mittelwerte pro Position als Kreuze dargestellt. Die gestrichelte Linie liegt auf 0 %, zu diesem Niveau werden beide Fahrten gleich bewertet.

6.3.5.2 Fahrdaten

Da der Fahrer auf der jeweils ersten Position die Geschwindigkeit des gesamten Pulks bestimmt, werden nur die ersten Fahrer bei deren Auswertung berücksichtigt. Mit Nebenaufgabe fahren die Probanden im Mittel um 1.27 km/h bzw. 1.57 % langsamer (ohne Nebenaufgabe: $M = 80.71$ km/h; $SD = 0.52$; mit Nebenaufgabe: $M = 79.44$ km/h; $SD = 2.57$). Aufgrund der geringen Stichprobenzahl ist kein inferenzstatistischer Vergleich möglich.

Mit Nebenaufgabe verbessert sich die Spurhaltung⁶: Zum einen verringert sich die SDLP ($t(15) = 5.04$; $p < .001$; siehe Abbildung 39 links) und zum anderen die Häufigkeit des Verlassens der Fahrspur mit Nebenaufgabe ($t(15) = 3.91$; $p < .001$; siehe Abbildung 39 rechts).

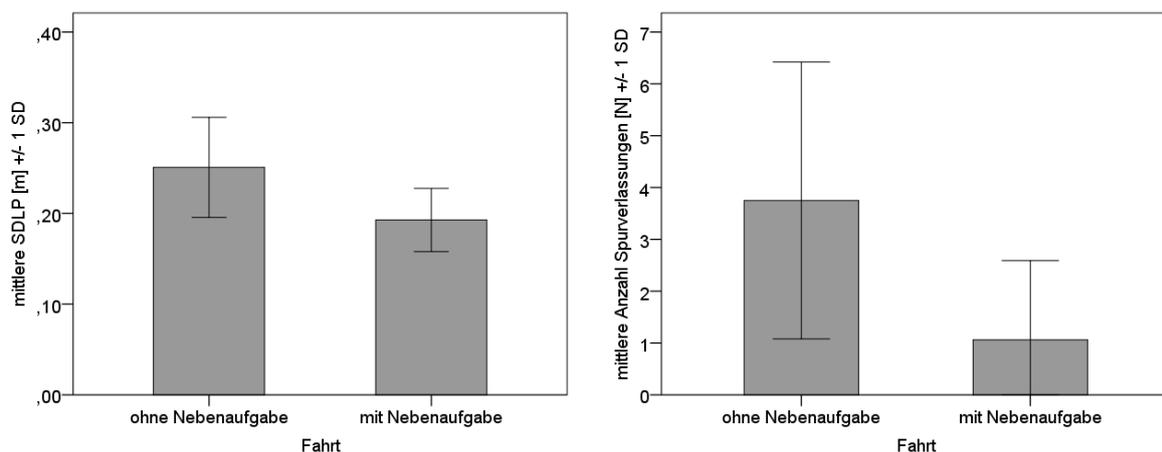


Abbildung 39: SDLP (links) und Anzahl an Spurverlassungen (rechts) für die Fahrten ohne und mit Nebenaufgabe. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

⁶ Für die Auswertung der Spurhaltung wurden verschiedene Streckenelemente (z. B. Überholen langsamer oder parkender Fahrzeuge oder sehr kurvige Abschnitte), welche die lateralen Maße verzerren würden, ausgeschlossen.

Bei einer differenzierten Betrachtung nach Positionen sind die Verbesserungen in der Spurhaltung bei der ersten Position stets am geringsten, während sie auf der dritten (bzgl. SDLP) bzw. vierten (bzgl. Spurverlassen) Position am höchsten sind (siehe Abbildung 40).

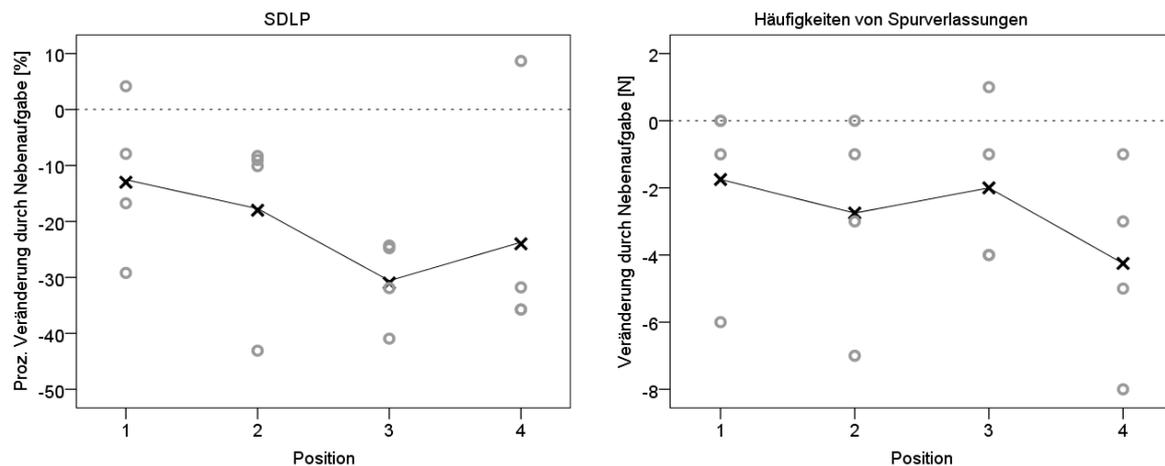


Abbildung 40: Prozentuale Veränderungen der mittleren SDLP zwischen den Fahrten ohne und mit Nebenaufgabe (links). Absolute Veränderungen der Häufigkeiten des Spurverlassens⁷ (rechts). Positive Werte bedeuten, dass der Parameter mit Nebenaufgabe größer ausfällt. Die Werte der einzelnen Fahrer sind als Kreise, die Mittelwerte pro Position als Kreuze dargestellt. Die gestrichelte Linie liegt auf 0 % (links) bzw. 0 (rechts), zu diesem Niveau liegen dieselben Werte in den beiden Fahrten vor.

6.3.5.3 Zusammenfassung

Die Einführung einer kognitiven Nebenaufgabe führt zu deutlichen Effekten im Erleben und Verhalten: Zum einen wird Fahren mit Nebenaufgabe als negativer beurteilt (u.a. anstrengender, schwieriger, weniger sicher). Zum anderen aber führt die Nebenaufgabe bezüglich der lateralen Kontrolle zu positiven Effekten: Mit kognitiver Beanspruchung verringert sich die Spurschwankung und die Fahrer verlassen seltener die Fahrbahn. Diese Ergebnisse sind übereinstimmend mit mehreren Befunden aus der Literatur (z. B. Jamson & Merat, 2005; Liang & Lee, 2010). Weiterhin wird mit Nebenaufgabe deskriptiv geringfügig langsamer gefahren.

Um den Effekt von Führungsfahrzeugen bei dieser Doppelaufgabe zu bestimmen, wurden die Positionen im Pulk verglichen. In den Befragungen geben die Fahrer ähnliche Urteile zu verschiedenen Aspekten der Fahrt ab. Im Fahrverhalten dagegen könnte die Fahrerposition einen Einfluss auf diese Effekte haben: Während die Nebenaufgabe beim ersten Fahrer des Pulks (ohne Folgefahrbedingung) nur einen geringen Effekt auf die Spurhaltung hat, scheinen die Fahrer auf den hinteren Positionen (mit Folgefahrbedingung) von der Nebenaufgabe in einem höheren Ausmaß zu profitieren.

⁷ In der Darstellung der Veränderung des Spurverlassens wurden im Gegensatz zu den sonstigen Darstellungen absolute Häufigkeiten gewählt, da prozentuale Veränderungen bei einem Vorkommen von Null in der Fahrt ohne Nebenaufgabe nicht berechnet werden können.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Folgefahren einen positiven Effekt auf die Querführung während kognitiver Beanspruchung hat. Eine Konzentration der Blicke in die Fahrbahnmitte könnte ursächlich für dieses Ergebnis sein. Die Fahrer auf hinteren Positionen könnten länger und häufiger zum Führungsfahrzeug blicken, welches daraufhin als externe Referenz für die Spurhaltung verwendet werden kann (Salvucci & Gray, 2004). Die Aussagen einzelner Fahrer, mit Nebenaufgabe stark auf das Vorderfahrzeug fixiert gewesen zu sein, unterstützen diese Annahme. Dem Fahrer auf erster Position fehlt dagegen diese externe Referenz, was zu dem geringeren positiven Einfluss der Nebenaufgabe beitragen könnte.

Für eine Unterstützung dieser Vermutung sind weitere Studien in der Pulksimulation notwendig. Diese sollten auch das Blickverhalten während des Folgefahrens erfassen. Hierdurch könnte bestimmt werden, ob sich der Anteil der Blicke zur Fahrbahnmitte zwischen Fahrten mit und ohne Führungsfahrzeug unterscheidet. Weiterhin ist eine höhere Anzahl an Probanden erforderlich, um die Ergebnisse statistisch absichern zu können.

6.3.6 Wie wirken sich verschiedene Abstandsinstruktionen aus?

Wird in der Pulksimulation Folgefahren untersucht, sollten die Abstände zwischen den Fahrern nicht zu groß werden. Dies würde zu freiem Fahren führen, bei dem die Fahrer ihre Geschwindigkeit unabhängig von vorausfahrenden Fahrzeugen wählen können. In diesem Fall könnten die Vorteile der Pulksimulation nicht ausgeschöpft werden und eine Einzelsimulation als Untersuchungsmethode möglicherweise günstiger sein. Daher muss eine Instruktion bezüglich des Abstandsverhaltens verwendet werden, die zu gebundenem Fahren führt. Damit sind die Fahrer in ihrem Geschwindigkeitsverhalten voneinander abhängig.

Zu diesem Zweck wurden drei verschiedene Abstandsinstruktionen miteinander verglichen: „halber Tacho einhalten“, „komfortabel sichere Abstände einhalten“ und „geringstmöglich sichere Abstände einhalten“ (siehe Kapitel 6.2.3). Zum einen sollte geprüft werden, ob die Instruktionen zu unterschiedlichem Abstandsverhalten führen. Zum anderen sollte durch die erhoffte Variation an Abständen bestimmt werden, bis zu welchen Abständen gebundenes Fahren in der Pulksimulation vorliegt und ab wann es in freies Fahren übergeht. Hierdurch sollten wieder Rückschlüsse auf die Tauglichkeit der Instruktionen für Folgefahr-Fragestellungen in der Pulksimulation möglich sein.

6.3.6.1 Effekte der Instruktionen

Die Instruktionen führen zu unterschiedlichem Abstandsverhalten: Die Mediane⁸ der Fahrer mit komfortablen Abständen sind am größten, während sich geringstmögliche Abstände und die unter halbem Tacho gefahrenen nicht unterscheiden (Kruskal-Wallis-Test: $\chi^2(2) = 7.41$; $p = .025$; siehe Abbildung 41 links). Abstände unter 1 s treten bei komfortablen Abständen

⁸ Der Median wurde als Lagemaß verwendet, da er weniger stark ausreißerempfindlich ist als das arithmetische Mittel. Insbesondere beim Anhalten an Ampeln oder beim Überholen ist mit Ausreißerwerten zu rechnen.

kaum auf (siehe Abbildung 41 rechts). Häufiger geschieht dies in den anderen beiden Bedingungen (Kruskal-Wallis-Test: $\chi^2(2) = 8.01$; $p = .018$), die sich auch hier nicht im Mittel unterscheiden. Von einzelnen Fahrern der „geringstmöglich“-Bedingung werden sogar 42 % bzw. 60 % der Zeit Abstände kleiner als 1 s genutzt.

Der Median der Abstände ist bei den Fahrern unter halbem Tacho am ähnlichsten (siehe Abbildung 41 links). Dagegen führen die anderen Instruktionsbedingungen zu größeren Varianzen (Levene-Test: $F(2, 31) = 5.54$; $p = .009$).

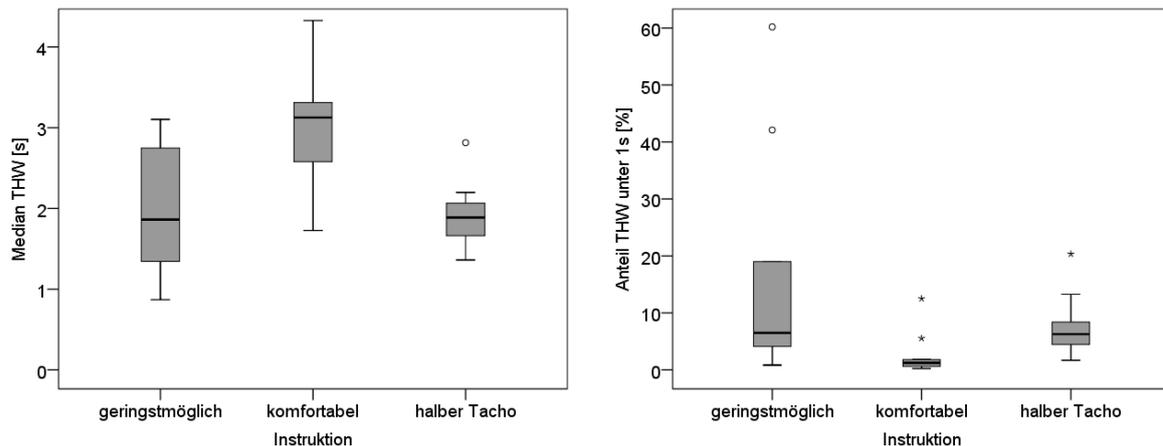


Abbildung 41: Median des Time-Headway (links) und Anteil des Time-Headway kleiner als 1 s (rechts) für die drei Instruktionen. Dargestellt sind Boxplots.

6.3.6.2 Effekte der Abstände

Vogel (2002) untersuchte bereits für Realfahrdaten die Frage, ab welchem Sekundenabstand freies Fahren vorliegt. Hierzu wurden Geschwindigkeiten und Abstände von mehr als 100.000 Fahrzeugen erfasst. Die Abstände wurden in Kategorien eingeteilt und innerhalb dieser Kategorien wurden die Korrelationen zwischen den Geschwindigkeiten zweier aufeinander folgender Fahrzeuge berechnet. Es zeigen sich unterschiedliche Regressionsgeraden für Sekundenabstände kleiner bzw. größer als 6 s (siehe Abbildung 42). Daher folgert die Autorin, dass bei 6 s der Übergang vom gebundenen ins freie Fahren vorliegt.

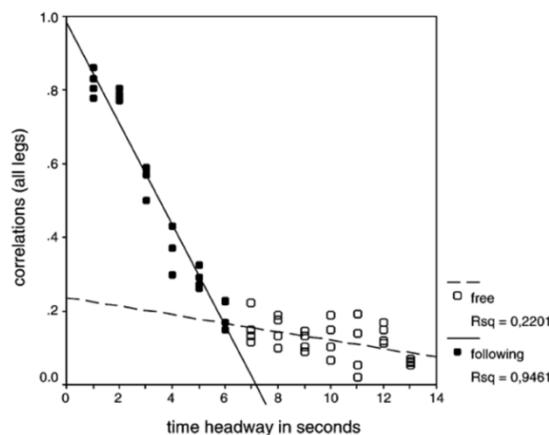


Abbildung 42: Zusammenhang zwischen Time-Headway und Korrelation zwischen den Geschwindigkeiten aufeinander folgender Fahrzeuge aus der Studie von Vogel (2002, S. 23).

Ob dieser Zusammenhang auch für Daten in der Pulksimulation mit instruiertem Abstandsverhalten gilt, wird im Folgenden berichtet. Hierzu wurde die Methodik von Vogel (2002) angewendet. Um an eine breite Datenbasis von Abstandsdaten zu gelangen, wurden alle zehn Sekunden die Time-Headways der Fahrer auf zweiter, dritter und vierter Position abgegriffen. Fahrsituationen mit Abbremsen in den Stand (z. B. an roten Ampeln) wurden hierbei ausgeschlossen, da hier extreme Time-Headways entstehen.

Abbildung 43 links zeigt die Rohverteilungen der Abstände für die Instruktionen. Die komfortablen Abstände ($M = 3.18$ s; $SD = 1.68$) fallen am größten aus, gefolgt von den geringstmöglichen Abständen ($M = 2.18$ s; $SD = 1.25$). Im Durchschnitt wird unter der Instruktion „halber Tacho“ ($M = 2.03$ s; $SD = 0.92$) mit den geringsten Abständen gefahren. Betrachtet man sich jedoch die Häufigkeit von Abständen kleiner als eine Sekunde, treten diese erwartungsgemäß am häufigsten in der Bedingung „geringstmögliche Abstände“ auf (17.55 %, siehe Kategorisierung der Abstände in Abbildung 43 rechts). Unter komfortablen Abständen (2.64 %) bzw. bei halbem Tacho (7.11 %) sind diese geringen Abstände seltener.

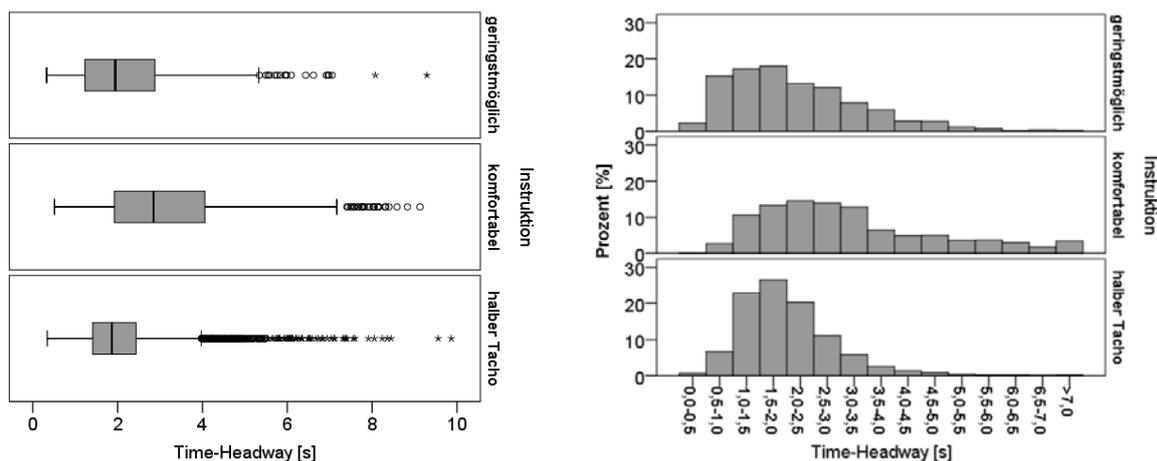


Abbildung 43: Verteilung von Time-Headways unter den drei Instruktionen. Dargestellt sind Boxplots (links). Prozentuale Häufigkeiten der Abstandskategorien (rechts).

Für die gebildeten Time-Headway-Kategorien wurde nun dieselbe Berechnung wie nach Vogel (2002) durchgeführt. Abbildung 44 links zeigt die Korrelationen getrennt nach Instruktionen. Zunächst fällt auf, dass bei komfortablen Abständen und halbem Tacho mit zunehmendem Time-Headway der Zusammenhang abnimmt. In der Bedingung „geringstmöglich“ zeigen sich ab 4,5 s höhere Werte, was aufgrund der geringen Häufigkeiten allerdings eine Verzerrung sein kann. Unabhängig vom Time-Headway beträgt die Korrelation für die Instruktion „geringstmöglich“ $r = 0.88$ ($p < .001$), für die Instruktion „halber Tacho“ $r = 0.89$ ($p < .001$) und für komfortable Abstände $r = 0.83$ ($p < .001$). Der Zusammenhang bei komfortablen Abständen ist geringer als bei geringstmöglichen Abständen (Fisher-Z-Test: $Z = 4.51$, $p = .008$) und bei halbem Tacho ($Z = 7.66$, $p < .001$). Diese beiden unterscheiden sich dagegen nicht ($Z = 1.68$, n. s.).

Auch über alle Bedingungen hinweg zeigt sich der Trend, dass mit zunehmendem Time-Headway der Zusammenhang abnimmt (siehe Abbildung 44 rechts). Jedoch ist dieser Abfall bei Weitem nicht so eindeutig wie bei Vogel (2002).

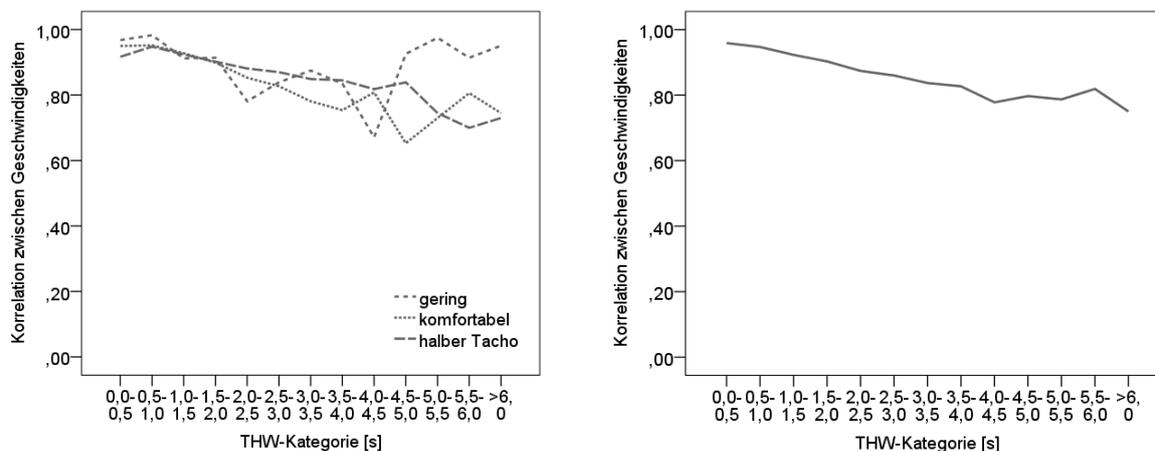


Abbildung 44: Zusammenhang zwischen Time-Headway (THW) und Korrelation zwischen den Geschwindigkeiten aufeinander folgender Fahrzeuge getrennt für die drei Instruktionen (links) und alle Instruktionen gemeinsam (rechts).

6.3.6.3 Zusammenfassung

Das in der Pulk simulationsstudie instruierte Abstandsverhalten führt dazu, dass auch bei größeren Abständen noch gebundenes Folgefahren vorliegt. Somit kann für die verwendeten Instruktionen keine Schwelle für den Übergang vom freien ins gebundene Fahren definiert werden. Dies unterscheidet sich zum Fahren ohne Instruktion, bei dem die Abhängigkeiten zwischen den Fahrzeugen mit zunehmendem Abstand deutlicher abnehmen und von Vogel (2002) ein Schwellwert für freies Fahren bestimmt wurde.

Im direkten Vergleich der drei verwendeten Instruktionen sticht vor allem die Instruktion „komfortable Abstände einhalten“ heraus: Hier sind die gefahrenen Abstände größer und die Abhängigkeit im Fahren geringer. Die Abstandsinstruktionen „geringstmögliche Abstände einhalten“ und „halber Tacho“ sind sich dagegen in diversen Parametern ähnlich (Median, Anteil unter 1 s Abstand). Jedoch ist die interindividuelle Varianz unterschiedlich: Während bei halbem Tacho die meisten Fahrer ein ähnliches Abstandsverhalten zeigen, ist unter der Bedingung „geringstmöglich“ die Variabilität der Abstände größer. Wahrscheinlich liegt dies daran, dass die Einhaltung geringstmöglicher Abstände eine subjektive Vorgabe ist, die für jeden Fahrer unterschiedlich ausgeprägt ist. Die Instruktion halben Tacho einzuhalten ist dagegen eine eher objektive Vorgabe. Somit sollte die Instruktion „halber Tacho“ vor allem dann verwendet werden, wenn der Abstand zwischen den Fahrzeugen möglichst gleich gehalten werden soll.

6.3.7 Mit welchen Parametern können Pulk beschrieben werden?

Es existieren zahlreiche Parameter, um das Fahrverhalten eines Fahrers zu analysieren. Ähnliches gilt für die Darstellung des gesamten Verkehrsflusses. Für Pulk von Fahrern stehen solche Maße dagegen noch nicht zur Verfügung. Dies ist allerdings wichtig, um das Verhalten auf dieser Ebene, die zwischen den Polen „Fahrer“ und „Verkehr“ liegt (siehe Kapitel 1), zu beschreiben. Hierdurch können Informationen gewonnen werden, die über den einzelnen Fahrer hinausgehen und seine Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern darstellen. Bei ausreichender Anzahl von Fahrzeugen in der Pulksimulation sind sogar Aussagen über den gesamten Verkehr möglich. Daher werden in diesem Kapitel derartige Parameter entwickelt.

Beispielhaft wird dies für die Quer- und Längsführung durchgeführt, da für deren Beschreibung beim einzelnen Fahrer schon zahlreiche Parameter vorhanden sind. Bezüglich der Querführung sind dies z. B. die SDLP, die Häufigkeit des Verlassens der Fahrspur oder die Lenkwinkelgeschwindigkeit. Bei der Beschreibung der Längsführung stehen dagegen unter anderem Geschwindigkeitsparameter oder Maße des zeitlichen und absoluten Abstands zu vorausfahrenden Fahrzeugen zur Verfügung.

Parameter für Fahrerpulk hinsichtlich Quer- und Längsführung fehlen dagegen und werden im Folgenden konstruiert. Anschließend wird geprüft, ob die neuen Parameter Variationen der Querführung und der Längsführung abbilden können. Hierfür wird auf die Manipulationen durch die Nebenaufgabe (siehe Kapitel 6.3.5) bzw. die Instruktion (siehe Kapitel 6.3.6) und streckenbedingte Veränderungen zurückgegriffen. In einem letzten Schritt werden Anwendungsbeispiele für derartige Parameter aufgezeigt.

6.3.7.1 Entwicklung der Maße

Querführung

Ein Maß für die Querführung ist die laterale Distanz des Fahrerpulk. Diese beschreibt die Fahrbreite des Fahrerpulk, gemessen von der Trajektorie des am innersten fahrenden Fahrzeugs bis hin zur Trajektorie des am äußersten fahrenden Fahrzeugs (siehe Abbildung 45 links). Mit zunehmender Homogenität des Fahrverhaltens im Pulk wird die laterale Distanz geringer, da die Fahrer in verstärktem Maße (wie „an der Perlenkette aufgereiht“) hintereinander fahren.

Analog zur SDLP für den einzelnen Fahrer ist dieser Parameter auch für den gesamten Fahrerpulk denkbar. Diese sogenannte $SDLP_{\text{Pulk}}$ wird wie die SDLP für das Einzelfahrzeug berechnet, verwendet jedoch statt der lateralen Positionen des Einzelfahrzeugs über den Zeitverlauf die lateralen Positionen der Pulkfahrzeuge zu demselben Zeitpunkt (siehe Abbildung 45 rechts). Wenn die $SDLP_{\text{Pulk}}$ für jeden Zeitpunkt des betrachteten Streckenabschnitts berechnet wurde, werden alle diese Werte gemittelt, um den Parameter „mittlere $SDLP_{\text{Pulk}}$ “ für die gesamte Fahrt zu erhalten.

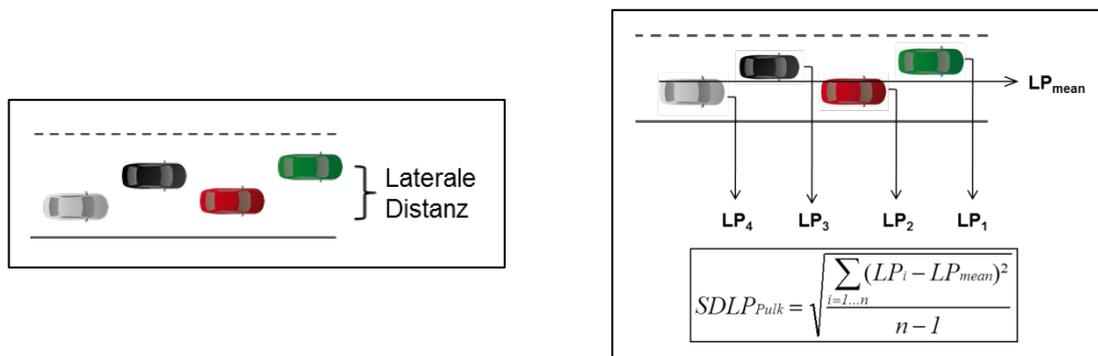


Abbildung 45: Berechnung der lateralen Distanz (links) und der $SDLP_{Pulk}$ (rechts).

Längsführung

Ein absolutes Abstandsmaß stellt die Pulklänge dar, welche die Entfernung von der vorderen Stoßstange des Führungsfahrzeugs bis zum Heck des letzten Fahrzeugs im Pulk umfasst (siehe Abbildung 46 links). Dieser Parameter ist jedoch geschwindigkeitsabhängig, da mit zunehmender Geschwindigkeit normalerweise größere Abstände gehalten werden. Daher wird in Anlehnung an den Time-Headway zwischen zwei Fahrzeugen ein verwandtes Abstandsmaß generiert, welches unabhängig von der Geschwindigkeit ist: Der Time-Headway vom letzten zum ersten Fahrzeug im Pulk (THW_{Pulk}) bezeichnet die Zeit, in der das letzte Fahrzeug im Pulk die Position des Führungsfahrzeugs erreicht hat (siehe Abbildung 46 rechts).

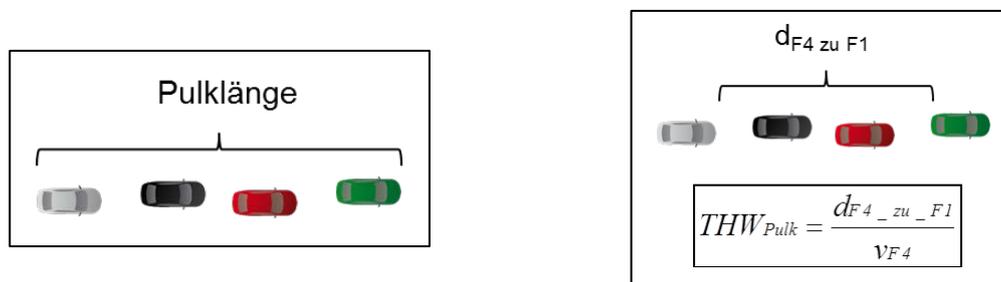


Abbildung 46: Berechnung der Pulklänge (links) und des THW_{Pulk} (rechts).

6.3.7.2 Prüfung der Maße

Die im vorigen Kapitel genannten Parameter sollen nun geprüft werden. Es wird untersucht, ob die Parameter Variationen bezüglich verschiedener Faktoren abbilden können. Falls dies gelingt, sind sie als taugliche Maße zur Beschreibung von Fahrerpulks anzusehen. Hierbei werden experimentelle Manipulationen der Quer- und Längsführung herangezogen:

- Durch die Einführung einer kognitiven Nebenaufgabe verbessert sich die Spurhaltung (Kapitel 6.3.5).
- Durch die Instruktion „gering“ vs. „komfortabel“ wird das Abstandsverhalten variiert (Kapitel 6.3.6).
- Durch die Einführung verschiedener Tempolimits (50 km/h, 70 km/h, 100 km/h) wird die Geschwindigkeit variiert.

Querführung

Die laterale Distanz wird exemplarisch für einen relativ geraden Landstraßenabschnitt der Strecke (Länge 850 m) betrachtet. Aus den Einzeltrajektorien der vier Fahrzeuge (siehe Abbildung 47 links) wird jeweils die laterale Distanz zwischen den extremsten Werten bestimmt. Schon aus der grafischen Abbildung wird deutlich, dass für dieselben Fahrer dieser „Schlauch“ ohne Nebenaufgabe (siehe Abbildung 47 oben rechts) breiter ist als mit Nebenaufgabe (siehe Abbildung 47 unten rechts).

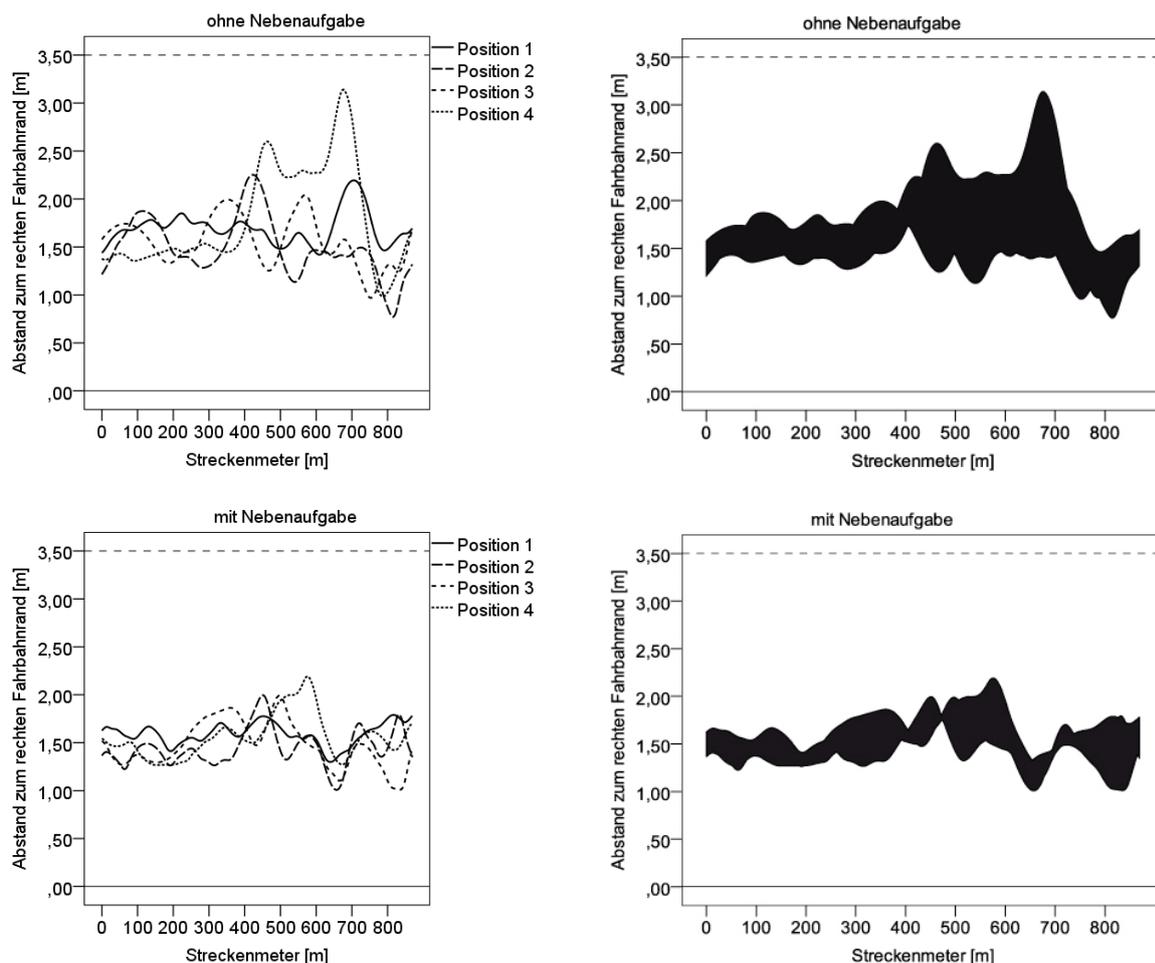


Abbildung 47: Einzeltrajektorien (links) und laterale Distanz zwischen den extremsten Fahrverläufen im Pulk (rechts) für einen Pulk ohne (oben) bzw. mit (unten) Nebenaufgabe. Die waagrechte durchgezogene Linie auf Position „0“ kennzeichnet den rechten Fahrbahnrand, die waagrechte gestrichelte Linie auf Position „3,5“ die Mittellinie der Straße.

Die mittlere laterale Distanz ist für den o. g. Streckenabschnitt für jeden Pulk mit Nebenaufgabe geringer als ohne Nebenaufgabe (siehe Tabelle 11). Durchschnittlich misst der Abstand der extremsten Trajektorien ohne Nebenaufgabe 0,60 m, während er mit Nebenaufgabe 0,41 m beträgt. Dies spricht für ein bezüglich der Querregulation homogeneres Fahren unter kognitiver Beanspruchung.

Tabelle 11: Mittlere laterale Distanz für die vier Pulk in den Fahrten ohne und mit Nebenaufgabe.

	mittlere laterale Distanz [m]	
	ohne	mit
Pulk 1	0.70	0.38
Pulk 2	0.62	0.43
Pulk 3	0.48	0.39
Pulk 4	0.62	0.45
gesamt	$M = 0.60$ ($SD = 0.09$)	$M = 0.41$ ($SD = 0.03$)

Mit Hilfe dieses Parameters kann das Fahrverhalten im Pulk auch für sehr spezifische Fahr-situationen beschrieben werden. Dies wird nun für das Szenario „Überholen eines parkenden Fahrzeugs“ beispielhaft gezeigt. Abbildung 48 links stellt die Trajektorien der einzelnen Fahrzeuge eines Pulks dar, in Abbildung 48 rechts ist die laterale Distanz eingefärbt.

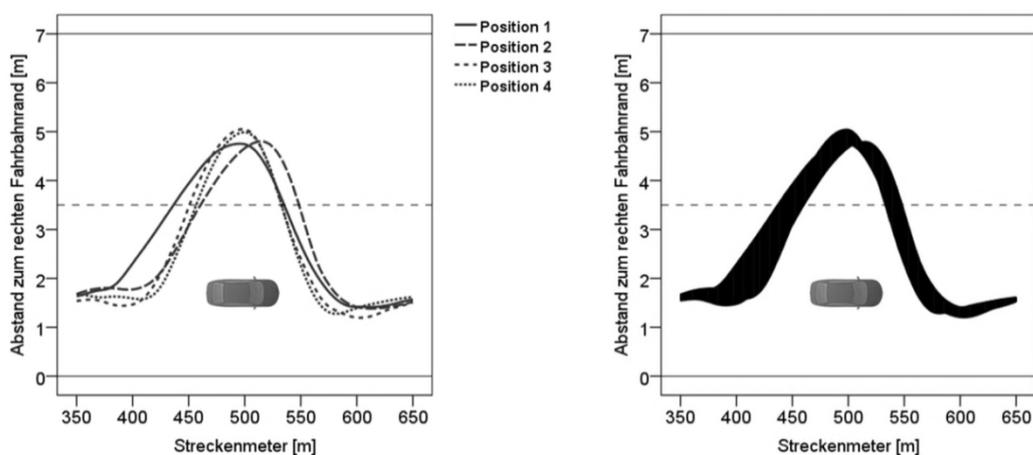


Abbildung 48: Einzeltrajektorien (links) und laterale Distanz (rechts) für einen Pulk ohne Nebenaufgabe in der Situation „Überholen eines parkenden Fahrzeugs“. Die waagrecht durchgezogenen Linien auf Position „0“ und „7“ kennzeichnen die Fahrbahnränder, die waagrecht gestrichelte Linie auf Position „3.5“ die Mittellinie der Straße. Das parkende Fahrzeug befindet sich auf Streckenmeter 500.

Abbildung 49 zeigt den Verlauf der durchschnittlichen lateralen Distanz (entspricht der Dicke des „Schlauchs“ aus Abbildung 48 rechts) über alle vier Pulk innerhalb dieser Situation. Mit kognitiver Beanspruchung fahren die Probanden im Pulk während der Spurwechsel (Streckenmeter 430-480 und 520-580) homogener, wohingegen in den Bereichen unmittelbar vor und nach den Spurwechseln (Streckenmeter 350-430, 480-520 und 580-630) die lateralen Distanzen größer sind als ohne Nebenaufgabe.

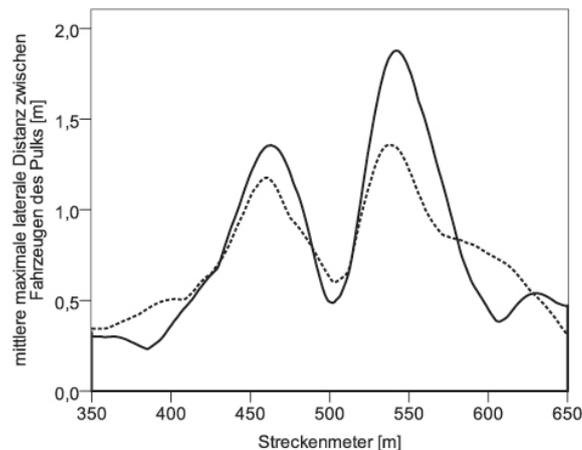


Abbildung 49: Durchschnittliche laterale Distanz des Pulks während der Situation „Überholen eines parkenden Fahrzeugs“. Das parkende Fahrzeug befindet sich auf Streckenmeter 500.

Auch die $SDLP_{\text{Pulk}}$ spiegelt die positiven Effekte der Nebenaufgabe hinsichtlich der Querführung wider. Dieser Wert ist für alle vier Pulks mit Nebenaufgabe geringer als bei deren Fahrten ohne Nebenaufgabe (siehe Tabelle 12). Eine inferenzstatistische Auswertung ist aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht möglich.

Tabelle 12: Mittlere $SDLP_{\text{Pulk}}$ für die vier Pulks in den Fahrten ohne und mit Nebenaufgabe.

	mittlere $SDLP_{\text{Pulk}}$ [m]	
	ohne	mit
Pulk 1	0.23	0.17
Pulk 2	0.27	0.22
Pulk 3	0.21	0.18
Pulk 4	0.24	0.20
gesamt	$M = 0.24$ ($SD = 0.02$)	$M = 0.19$ ($SD = 0.02$)

Längsführung

Die Pulkparameter für die Längsregelung geben das in Kapitel 6.3.6 beschriebene unterschiedliche Abstandsverhalten der einzelnen Fahrer wider. Sowohl Pulklänge (siehe Abbildung 50 links) als auch THW_{Pulk} (siehe Abbildung 50 rechts) scheinen für die Abstandsinstruktion „komfortabel“ größer zu sein als für die Instruktion „gering“. Eine inferenzstatistische Auswertung ist aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht möglich.

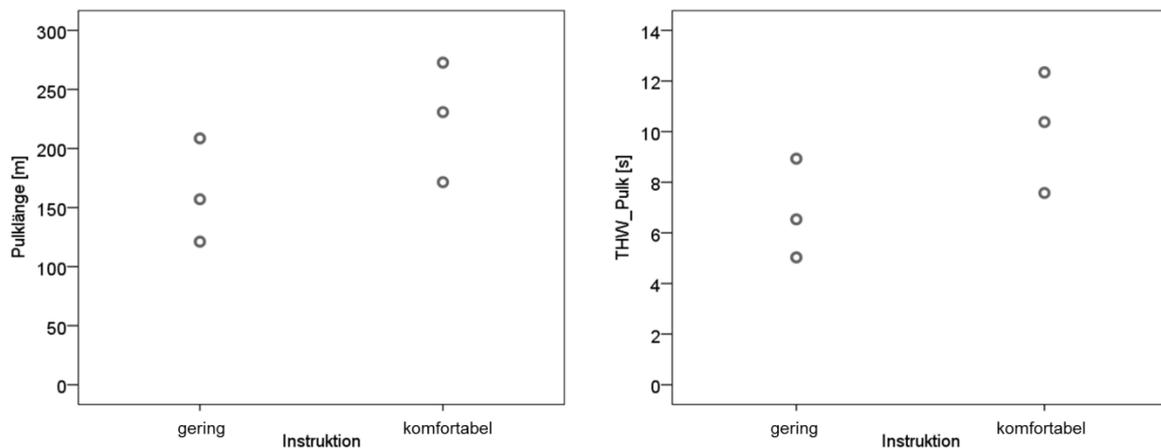


Abbildung 50: Pulklänge (links) und THW_{Pulk} (rechts) für die beiden Gruppen mit unterschiedlicher Abstandsinstruktion. Die Werte der einzelnen Pulks sind als Kreise dargestellt.

Nun stellt sich die Frage, ob diese Maße auch Variationen der Geschwindigkeit abbilden können. Wie jedoch Abbildung 51 links und rechts zeigt, können die beiden Maße Pulklänge und THW_{Pulk} die unterschiedlichen Geschwindigkeiten für die hier verwendete Versuchsstrecke nicht wiedergeben. Dies ist erstaunlich, da die Pulklänge aufgrund der oben beschriebenen Überlegungen eigentlich geschwindigkeitsabhängig sein sollte. Möglicherweise liegt dies an den unterschiedlichen Streckenverläufen, die sich neben der Geschwindigkeit in weiteren Faktoren wie Kurvigkeit, Höhenprofil oder Bebauung und Bepflanzung unterscheiden. Somit ist der Vergleich an dieser Stelle konfundiert.

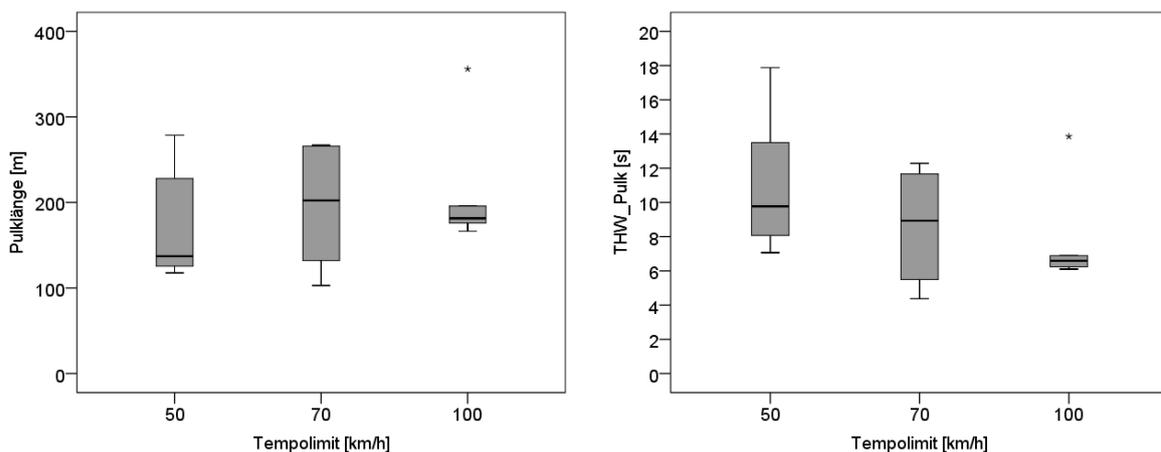


Abbildung 51: Pulklänge (links) und THW_{Pulk} (rechts) für Abschnitte mit verschiedenen Tempolimits. Dargestellt sind Boxplots.

Da der soeben beschriebene Vergleich zwischen kompletten Streckenabschnitten nicht methodisch kontrolliert erfolgen kann, wird im Folgenden das Verhalten der beiden Parameter in kürzeren Segmenten betrachtet. Hierzu werden die Ortsein- und -ausfahrten mit dem Wechsel von 100 km/h auf 50 km/h bzw. von 50 km/h auf 100 km/h herangezogen.

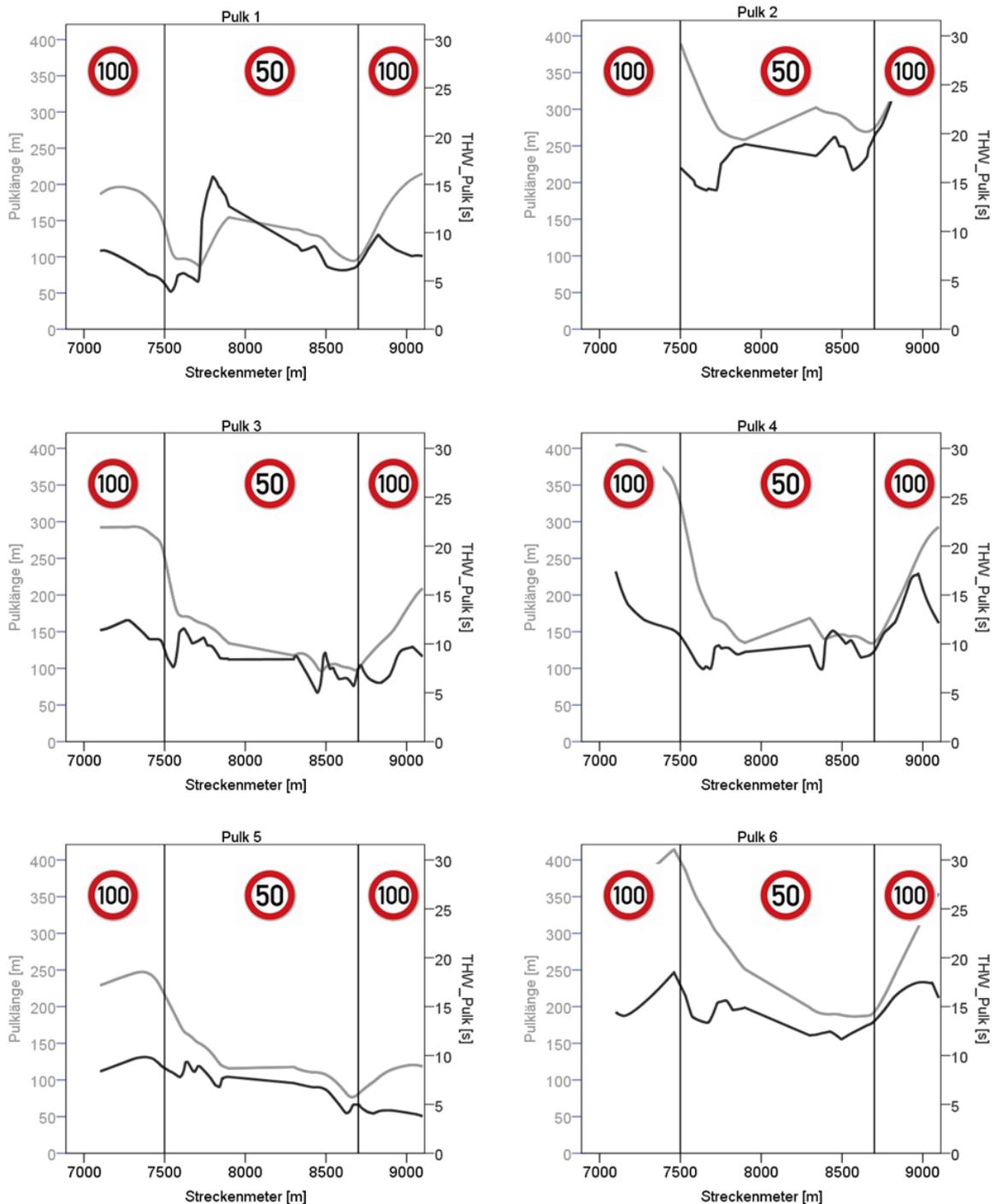


Abbildung 52: Einzelverläufe über Pulklänge (grau) und THW_{Pulk} (schwarz) von sechs Fahrerpulks über den Streckenmeter. Die senkrechten Linien markieren die Ortseinfahrt (Streckenmeter 7500) bzw. die Ortsausfahrt (Streckenmeter 8700).

Wie in Abbildung 52 zu sehen ist, führen Geschwindigkeitswechsel in der Pulklänge zu größeren Veränderungen als in dem THW_{Pulk} . Die Pulklänge verringert sich bei der Ortseinfahrt und wird bei der Ortsausfahrt wieder größer. Dieses Muster ist sowohl für Pulks mit größeren Längen (Pulks 2, 4 und 6) als auch bei kleineren Längen zu beobachten. Sie kann somit als Maß für Geschwindigkeitsänderungen herangezogen werden. Der THW_{Pulk} dagegen bleibt

während des betrachteten Streckenabschnitts konstanter. Trotzdem sind auch hier bei allen Pulks während der Ortseinfahrt Abnahmen im Parameter zu beobachten. Während der Ortsausfahrt steigt das Maß bei vier (Pulks 1, 2, 4, 6) von sechs Pulks wieder an. Somit können mit der Pulklänge und in vielen Fällen auch mit dem THW_{Pulk} Geschwindigkeitswechsel beschrieben werden. Die Pulklänge ist hierbei stärker geschwindigkeitsabhängig als der THW_{Pulk} .

6.3.7.3 Anwendungsbezogene Beispiele zur Nutzung

Wie im vorigen Kapitel berichtet, können die Pulkparameter verschiedene Variationen eines Pulks abbilden. Ein Anwendungsbereich dieser Kenngrößen liegt in der Bewertung von Fahrerassistenzsystemen. Beispielsweise können mit den Pulkparametern die Effekte verschiedener Ausstattungsraten verglichen werden. Da hierfür keine passenden Daten in der Pulksimulation vorliegen, wird die Einführung eines solchen Systems simuliert. Hierzu werden die Fahrdaten der mit simuliertem System ausgerüsteten Fahrer nachträglich entsprechend der Funktionsspezifikation angepasst. Dieses Vorgehen wird in den nächsten beiden Kapiteln jeweils für ein die Querführung (Spurhalteassistent) und ein die Längsführung (Abstandsregelsystem) betreffendes Assistenzsystem dargestellt.

Querführung: Fiktiver Spurhalteassistent

Für die Prüfung der Parameter zur Querführung wird ein fiktiver Spurhalteassistent eingeführt. Dieses Assistenzsystem hilft dem Fahrer, in der Spur zu bleiben und begrenzt die Fahrspur des ausgestatteten Fahrzeugs auf den 80 %-Spurkanal. Da der Fahrstreifen 3.50 m breit ist, werden Werte der lateralen Position eines ausgestatteten Fahrzeugs somit auf den mittleren Spurkanal mit einer Breite von 2.80 m angepasst (siehe Abbildung 53).

Der Spurhalteassistent wird in den Ausstattungsraten 0 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 % umgesetzt – je nachdem, über wie viele Fahrer die Anpassung der lateralen Position erfolgt.

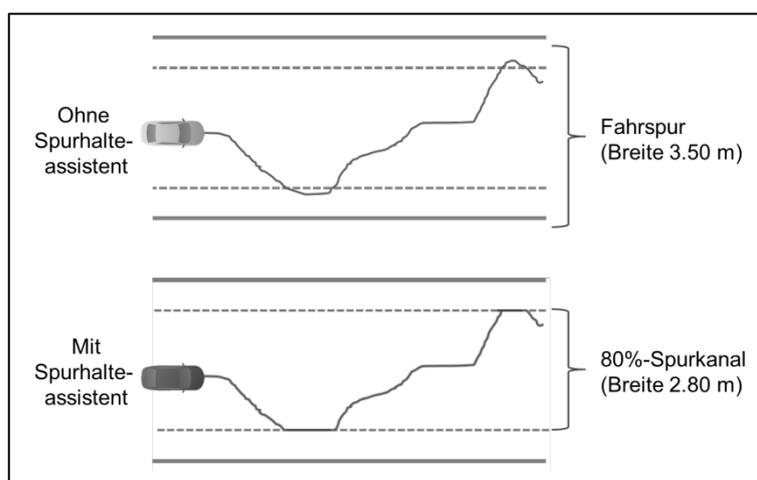


Abbildung 53: Schematische Darstellung für gefahrene Trajektorie ohne (oben) und mit (unten) Spurhalteassistent.

Abbildung 54 zeigt exemplarisch für die Fahrt eines Pulks das Ergebnis der Einführung des Spurhalteassistenten. Die Breite des dargestellten „Schlauchs“ nimmt sukzessive ab: Je höher die Ausstattungsrate des Systems, desto geringer wird die laterale Distanz.

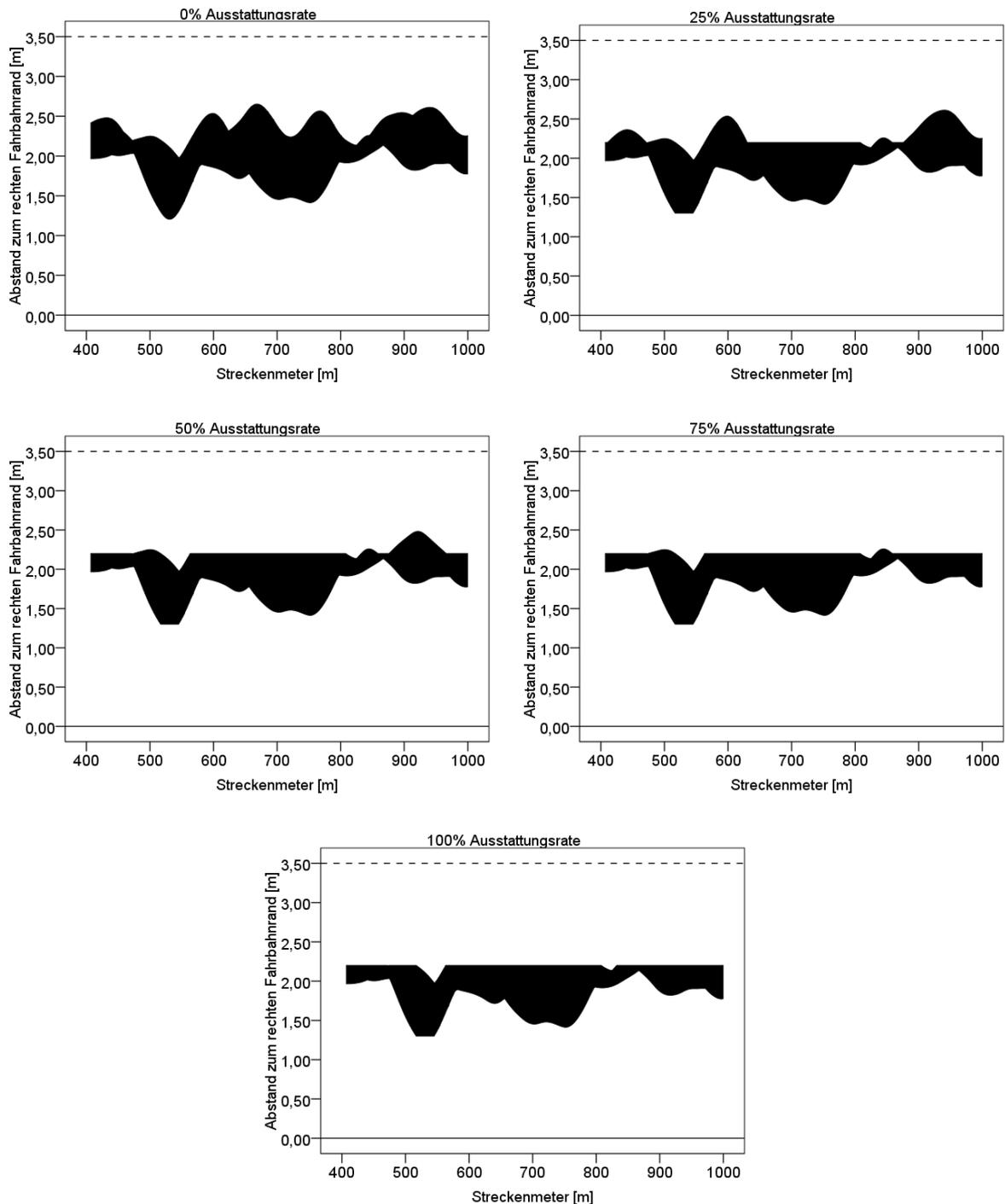


Abbildung 54: Laterale Distanz eines Pulk für die Ausstattungsraten 0 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 % des fiktiven Spurhalteassistenten. Die durchgezogene Linie auf Position „0“ kennzeichnet den rechten Fahrbahnrand, die gestrichelte Linie auf Position „3.5“ die Mittellinie der Straße.

Über die komplette Stichprobe aller Pulks ist der Verlauf der mittleren lateralen Distanz in Abbildung 55 links dargestellt. Abbildung 55 rechts zeigt den Effekt der Ausstattungsrate für den zweiten verwendeten Parameter, die $SDLP_{Pulk}$. Beide Parameter besitzen ähnliche Entwicklungen: Mit zunehmender Ausstattungsrate werden die Maße geringer und zeigen somit eine verbesserte Querführung.

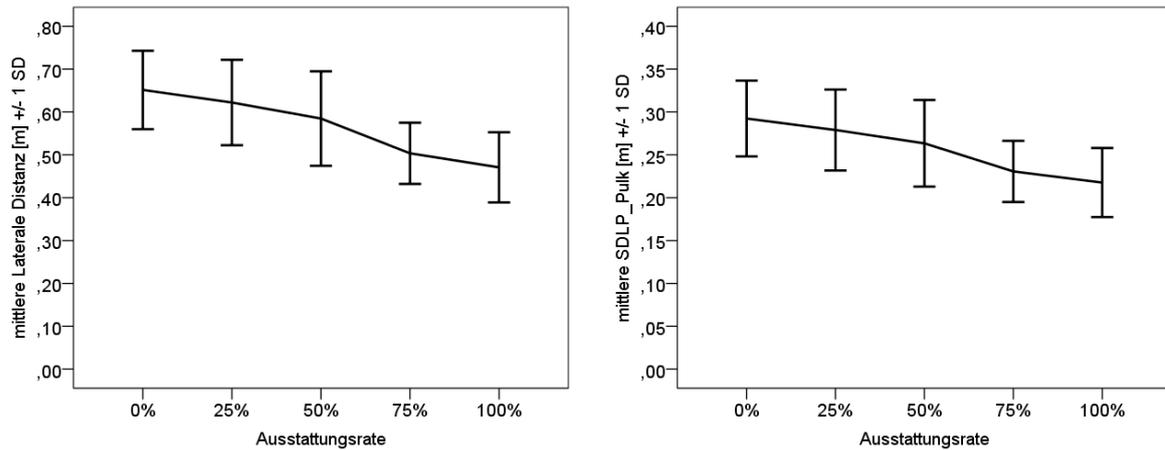


Abbildung 55: Laterale Distanz (links) und $SDLP_{Pulk}$ (rechts) für verschiedene Ausstattungsraten des fiktiven Spurbalteaassistenten. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Längsführung: Fiktives Abstandsregelsystem

Um die Parameter zur Längsführung zu testen, wird ein fiktives Abstandsregelsystem nachträglich simuliert. Dieses System soll dichtes Auffahren verhindern und lässt keine geringeren Time-Headways als 2.0 s zu. Kleinere Time-Headways werden somit an diesen Minimalwert angepasst, alle anderen Werte bleiben bestehen (siehe Kapitel 1).

Das Abstandsregelsystem wird in den Ausstattungsraten 0 %, 33 %, 67 % und 100 % eingeführt – je nachdem, wie viele der Fahrzeuge auf den Positionen 2, 3 und 4 ausgestattet sind. Für das Fahrzeug auf Position 1 ist die Ausstattung bedeutungslos, da es kein Führungsfahrzeug besitzt.

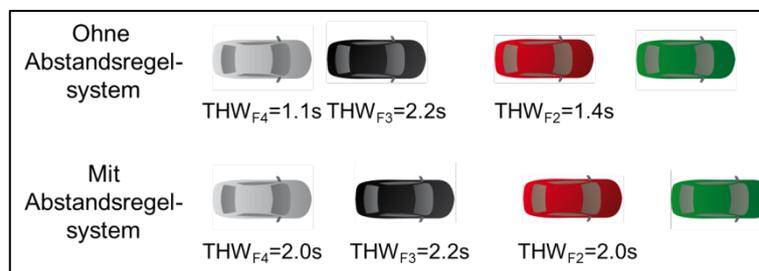


Abbildung 56: Beispiel für Time-Headways (THW) der Fahrer in den hinteren drei Fahrzeugen des Pulks F2, F3 und F4 ohne (oben) und mit (unten) Abstandsregelsystem. Time-Headways kleiner als 2.0 s werden an diesen Wert angepasst.

Mit zunehmender Systemausstattung nehmen THW_{Pulke} (siehe Abbildung 57 links) und Pulklänge (siehe Abbildung 57 rechts) sukzessive zu. Allerdings ist der Anstieg eher gering, da das System den Abstand nur um wenige Zentimeter bzw. Sekunden vergrößert.

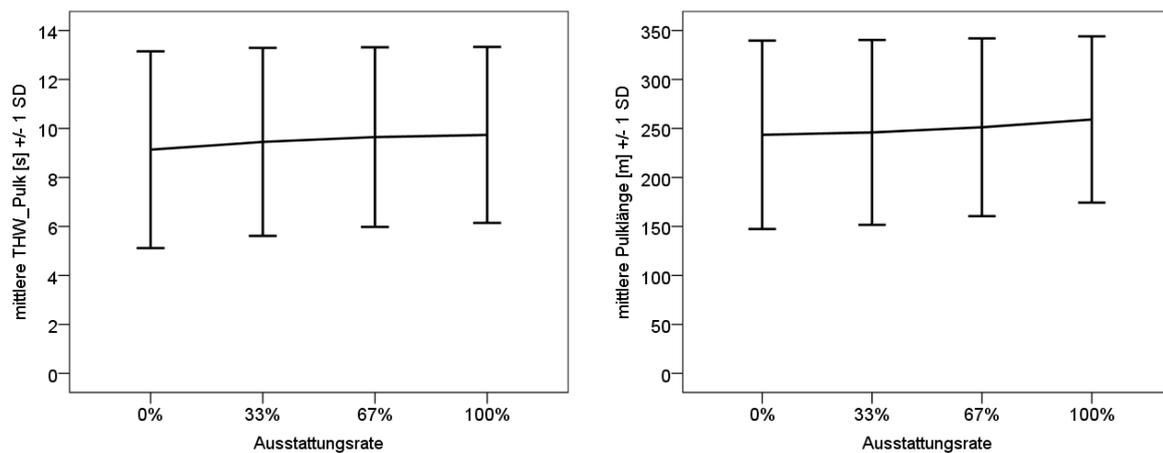


Abbildung 57: THW_{Pulke} (links) und Pulklänge (rechts) für verschiedene Ausstattungsrates des fiktiven Abstandsregelsystems. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

6.3.7.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Parameter zur Beschreibung der Quer- und Längsführung von Fahrzeugpulks entwickelt. Für die Querführung sind dies die laterale Distanz und die $SDLP_{Pulke}$, für die Längsführung sind es die Pulklänge und der THW_{Pulke} .

Die Variationen experimenteller Manipulationen (Nebenaufgabe zur Verbesserung der Spurhaltung, Instruktion zur Variation des Abstands), die auf Ebene der einzelnen Fahrer mit klassischen Parametern gezeigt werden können, sind nun auch auf Gruppenebene nachweisbar. Zusätzlich können mit den Parametern einzelne Fahrsituationen detailliert betrachtet werden. So dient die laterale Distanz beispielsweise zur Beschreibung eines Überholmanövers. Geschwindigkeitswechsel wie z. B. bei einer Ortseinfahrt gehen dagegen mit Änderungen in den Verläufen von Pulklänge und THW_{Pulke} einher.

Die Pulkparameter können in der Evaluierung von Fahrerassistenzsystemen Anwendung finden. Durch ihren Einsatz ist es z. B. möglich, unterschiedliche Ausstattungsrates eines Systems zu vergleichen. Hierdurch können letztendlich sogar Aussagen über den gesamten Verkehrsfluss getroffen werden.

6.3.8 Wie kann das Verhalten des Pulks an Kreuzungen untersucht werden?

Neben dem Folgefahren, welches in den bisherigen Fragestellungen eingehend betrachtet wurde, stellen Kreuzungen eine weitere Möglichkeit zur Interaktion zwischen mehreren Fahrzeugen dar. Daher wird nun geprüft, inwiefern Kreuzungsinteraktionen in der Pulksimulation untersucht werden können.

Insgesamt befuhren sechs Viererpulks die Strecke mit den acht Kreuzungsabschnitten. Zunächst ist positiv zu bewerten, dass sich alle Fahrer die verbal gegebene Instruktion merken konnten und an der jeweils ersten Abzweigung eines Segments korrekt abgebogen sind. Somit näherten sich jeweils wie beabsichtigt zwei Fahrer von jeder Seite der Kreuzung an.

Für das Erreichen von Interaktionen an der Kreuzung ist wichtig, dass die Fahrer bis zum Auftrennen des Pulks möglichst nah beieinander fahren. Anschließend sollten die Fahrer bis zur Kreuzung ähnliche Geschwindigkeiten einhalten, um gleichzeitig an die Kreuzung zu gelangen. Falls sich die Probanden anders verhalten, erreichen sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten die Kreuzung und queren diese unbeeinflusst voneinander.

Interaktionen an der Kreuzung können gut mit einem Zeit-Weg-Diagramm beschrieben werden, wie im Folgenden an einem Beispielszenario dargestellt wird. Abbildung 58 links zeigt schematisch die Ausgangssituation: Das rote und grüne Fahrzeug nähern sich von links und das graue und schwarze von rechts der „rechts vor links“-geregelten Kreuzung. Somit haben das graue und schwarze Fahrzeug Vorfahrt. Rot erreicht die Kreuzung als erstes (beim Zeitpunkt 0 auf der Abszisse von Abbildung 58 rechts) und überquert diese sofort. Grün erreicht die Kreuzungsanfahrt als nächstes, bremst aber ab (erkennbar durch die abflachende Steigung) und gewährt dem grauen Fahrzeug Vorfahrt (dies ist durch das Kreuzen der grünen und grauen Linie erkennbar). Das schwarze Fahrzeug, von rechts kommend, bremst ebenfalls kurz ab, beschleunigt aber nach kurzer Zeit wieder und passiert die Kreuzung. Zuletzt fährt das grüne Fahrzeug in die Kreuzung ein.

Somit kann aus dem Zeit-Weg-Diagramm geschlossen werden, welcher Fahrer die Kreuzung als erstes erreicht und wer abbremst oder beschleunigt. Weiterhin sind Interaktionen (ein Fahrer reagiert auf das Fahrverhalten des anderen) ablesbar.

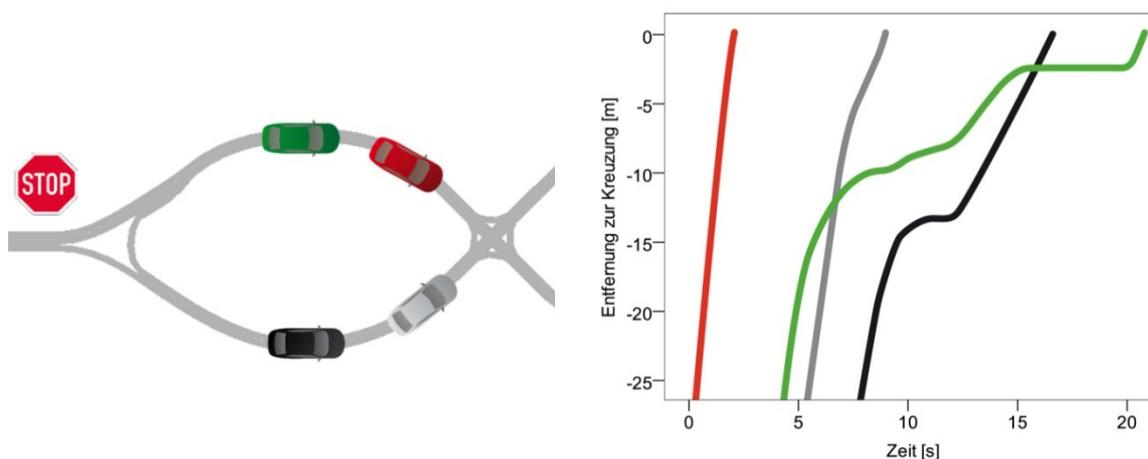


Abbildung 58: Ausgangssituation des Beispielszenarios (links) und entsprechendes Zeit-Weg-Diagramm (rechts). Die Abszisse zeigt die Zeit in Sekunden und die Ordinate die Entfernung zur Kreuzung in Metern an („0“ entspricht dem Beginn der Kreuzung). Jede Linie repräsentiert einen Fahrer.

6.4 Zusammenfassung und Diskussion

Im den ersten Untersuchungsansätzen wurden in erster Linie methodische Fragestellungen am Beispiel des Folgefahrens untersucht. Es konnte zunächst gezeigt werden, dass sich das Fahren im Pulk in vielen Aspekten vom Einzelfahren unterscheidet: Das Fahren wird als anstrengender und schwieriger beurteilt und es wird im Mittel langsamer gefahren. Da sich die Fahrer im Pulk auf eine Geschwindigkeit „einigen“ müssen, fahren wenige Probanden sogar schneller als in der Einzelfahrt. Auch für den ersten Fahrer finden sich diese Unterschiede. Dies ist erstaunlich, da diese Fahrer keine Vorderfahrzeuge hatten und die Fahrinstruktion gar nicht die hinteren Fahrer berücksichtigte.

Mit zunehmender Positionierung im Pulk bremsen weiter hinten fahrende Probanden stärker ab. Daher benötigen sie höhere maximale Geschwindigkeiten, um den Anschluss an die vorderen Fahrzeuge nicht zu verlieren. Dieses Phänomen ist als Ziehharmonika-Effekt bekannt. Bei den in der Fahrsimulation verwendeten Modellen ist dieser Effekt dagegen nur eingeschränkt zu beobachten und zeigt den Vorteil der Pulksimulation mit realen Fahrern.

In einzelnen sicherheitskritischen Fahrsituationen sinkt mit zunehmend hinterer Positionierung im Pulk die Vergleichbarkeit der Situation: Während die Fahrer an Position 1 relativ ähnlich reagieren, wird das Fahrverhalten mit zunehmender Positionierung immer variabler. In einer Ausweichsituation können die hinteren von den vorderen Fahrern profitieren und die Situation früher erkennen. Daher fällt die Situation für sie weniger kritisch aus. In ähnlicher Weise deuten einige Ergebnisse darauf hin, dass hintere Fahrer im Pulk bei Bearbeitung einer kognitiven Nebenaufgabe von ihrer Positionierung hinsichtlich höherer Spurhaltungsgewinne profitieren.

Diese Effekte auf die Querführung können genauso wie Variationen des Abstandsverhaltens (eingeführt durch unterschiedliche Instruktionen) für den gesamten Pulk beschrieben werden. Hierzu wurden Parameter entwickelt und geprüft, die auf den Abmessungen des Pulks bzw. dem Fahrverhalten innerhalb des Pulks basieren.

Mit Hilfe von Korrelationen lassen sich Abhängigkeiten beim Folgefahren erfassen. Durch die Einführung des Pulks und die Instruktion, stets zusammenzubleiben, ist die Beeinflussung nur wenig abhängig von dem gefahrenen Abstand. Auch mit größeren Abständen finden sich noch hohe Zusammenhänge im Geschwindigkeitsverhalten. Dies ist ein Unterschied zum freien Fahren, bei dem sich die Abhängigkeit mit zunehmendem Time-Headway stärker verringert.

Neben dieser eingehenden Betrachtung des Folgefahrens wurde explorativ geprüft, wie ein Pulk in einem Kreuzungsszenario untersucht werden kann. Mit dem gewählten streckenbaulichen Ansatz gelingt es, dass die Fahrer zum gleichen Zeitpunkt an die Kreuzung gelangen und dort zur Interaktion gezwungen werden. Das Fahrverhalten an Kreuzungen und die Reaktionen auf andere Fahrer können in einem Zeit-Weg-Diagramm gut veranschaulicht werden.

Nach diesen ersten vor allem methodisch orientierten Untersuchungsansätzen erfolgt nun als Zwischenbilanz ein Vergleich zu den anderen Untersuchungsmethoden. Zunächst erweisen sich die Einschränkungen der in der Einzelfahrsimulation verwendeten Fahrermodelle als Argument, das für die Pulksimulation spricht: Bei den Modellen ist der Ziehharmonika-Effekt nicht zu beobachten, bei den realen Fahrern dagegen schon. Somit sind Untersuchungen zu diesem Effekt, der beispielsweise immer wieder im Rahmen der Stautentstehung diskutiert wird (siehe Kapitel 8.1.1), für die Pulksimulation zu empfehlen.

Ein weiterer Unterschied zur Einzelfahrsimulation zeigt sich in der höheren Variabilität der Fahrsituationen. Da in einer Studie in der Pulksimulation mehrere reale Fahrer beteiligt sind, die aufeinander reagieren, sind die Prüfsituationen nicht so stark kontrolliert wie in der Einzelfahrsimulation. Selbst für den ersten Fahrer im Folgefahrt-Pulk spielt die Anwesenheit der hinter ihm folgenden Fahrer eine Rolle für sein Fahrverhalten.

In der Pulksimulation können echte Interaktionen zwischen Fahrern beobachtet und beschrieben werden. Dies ist weder in der Einzelfahrsimulation mit einem realen Fahrer noch in der Verkehrssimulation möglich, da hier jeweils das Verhalten des modellierten Verkehrs nach vorprogrammierten Mustern erfolgt.

Da für das Folgefahren nun schon mehrere Erfahrungen in den ersten Untersuchungsansätzen gewonnen werden konnten, sollen diese im folgenden Kapitel für inhaltliche Fragestellungen genutzt werden. Hierdurch wird das Potential der Pulksimulation noch deutlicher herausgearbeitet.

7 INHALTLICHE ANWENDUNGEN DER PULKSIMULATION

Die Anwendung der Pulksimulation für inhaltliche Fragestellungen wird in diesem Kapitel anhand zweier aktuell relevanter Beispiele untersucht. Hierfür wird die Evaluierung von sogenannten Car-to-X-basierten Fahrerassistenzsystemen gewählt.

Seit wenigen Jahren beschäftigen sich mehrere Forschungsprojekte wie z. B. sim^{TD} (Totzke, Mühlbacher, Buld, & Krüger, 2010) oder KO-FAS (Zecha & Rasshofer, 2009) mit der Entwicklung und Erprobung von Car-to-X-Technologien im Fahrzeug. Hierunter versteht man sowohl die Kommunikation von Fahrzeugen untereinander (Car-to-Car) als auch die Kommunikation von Fahrzeugen zu Infrastrukturkomponenten (Car-to-Infrastructure). Eingesetzt werden können diese Technologien, um mittels Fahrerassistenzsystemen die Fahrersicherheit und die Fahreffizienz zu erhöhen (Kleine-Besten, Kersken, Pöchmüller, & Schepers, 2009). Hierbei ergeben sich für Car-to-X-Systeme im Vergleich zu bisherigen Fahrerassistenzsystemen einige Besonderheiten:

- (1) Bisher stellte die Sensorik von Assistenzsystemen Informationen lediglich für das eigene Fahrzeug zur Verfügung. Car-to-X-Systeme dagegen versenden Nachrichten über eine größere Reichweite an mehrere Fahrer gleichzeitig. Je nach Situation kann dieselbe Nachricht (z. B. Hinweis auf ein Stauende) somit für verschiedene Fahrer andere Auswirkungen oder einen unterschiedlichen Nutzen haben: Befindet sich ein Fahrer in größerer Entfernung zur auslösenden Situation, stellt eine Car-to-X-Nachricht für ihn eher eine informierende Botschaft dar. Für andere Fahrer unmittelbar vor der Situation bedeutet dieselbe Nachricht dagegen eine Warnung.
- (2) Informationen schon weit vor der relevanten Situation können dazu führen, dass die Fahrer frühzeitig ihr Fahrverhalten ändern und z. B. ihre Geschwindigkeit reduzieren. Dieses Verhalten kann für Fahrer, die über diese Information nicht verfügen, nicht nachvollziehbar sein und informierte Fahrer könnten somit als Hindernis aufgefasst werden. In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass bei Car-to-X-Systemen die Interaktion der Verkehrsteilnehmer – insbesondere zwischen assistierten und nicht-assistierten Fahrern – eine große Rolle spielt.
- (3) Der Nutzen eines Car-to-X-basierten Assistenzsystems ist häufig von der Ausstattungsrate abhängig. In geringen Ausstattungsraten ist die Übertragung der Information zwischen den Fahrzeugen nicht sichergestellt. Daher stellt sich die Frage, ab welcher Ausstattungsrate ein Car-to-X-System eine verkehrliche Wirkung hat.

Diese Fragestellungen zu Situationsabhängigkeit, Interaktionen zwischen Fahrern und Ausstattungsraten können gut in der Pulksimulation behandelt werden, da hier mehrere Fahrer gleichzeitig in derselben Umgebung eingesetzt werden können. Die erste Studie beschäftigt sich mit einem Car-to-Car-basierten Gefahrenwarner, der die Fahrsicherheit erhöhen soll (siehe Kapitel 7.1). In der zweiten Untersuchung wird auf ein Car-to-Infrastructure-basierten Ampelphasenassistenten zur Steigerung der Effizienz eingegangen (siehe Kapitel 7.2).

7.1 Evaluierung eines Gefahrenwarners

7.1.1 Fragestellung

Der Gefahrenwarner ist ein Beispiel für ein Car-to-Car-basiertes Fahrerassistenzsystem. Dieses System soll den Fahrer frühzeitig über eine Gefahrenbremsung eines vorausfahrenden Fahrzeugs informieren. Somit soll die Fahrsicherheit erhöht und die Anzahl kritischer Situationen verringert werden.

Führt ein Fahrzeug eine Notbremsung durch (sog. Initialfahrzeug), wird dies erkannt und an nachfolgende Fahrzeuge übermittelt. Diese empfangen die Meldung und erzeugen, basierend auf einer Situationsbewertung, eine entsprechende optische und akustische Anzeige. Der Fahrer direkt hinter dem Initialfahrzeug erhält die Warnung praktisch gleichzeitig zum Aufleuchten der Bremslichter. Die nachfolgenden Fahrer werden zum selben Zeitpunkt gewarnt, befinden sich zum Initialfahrzeug allerdings in größerer Entfernung. Somit haben sie dadurch mehr Zeit, sich auf die bevorstehende eigene Bremsung vorzubereiten. Es ist daher anzunehmen, dass die Warnung umso hilfreicher ist, je weiter entfernt man vom Initialfahrzeug fährt. Möglich ist zudem, dass die Warnung für den ersten Fahrer hinter dem Initialfahrzeug sogar negative Auswirkungen hat, da sie gleichzeitig zu den Bremslichtern erfolgt und somit keine weiteren Informationen gibt. Dies könnte aufgrund des zusätzlichen visuellen Reizes zu einer verlangsamten Bremsreaktion in dieser Situation führen.

Genau diese Fragestellungen sollen im Folgenden geprüft werden. Die Pulksimulation wird als Methode gewählt, da hier mehrere Fahrer mit unterschiedlichen Entfernungen zum Initialfahrzeug in derselben Fahrsituation untersucht werden können. Da die Situation weitgehend kontrolliert ist, können die Positionen der Fahrer verglichen werden. Damit kann der Einfluss der Position auf den Nutzen des Systems bestimmt werden.

7.1.2 Methodik

7.1.2.1 Fahraufgabe

Die vier Fahrer hatten jeweils die Aufgabe, die Versuchsstrecken im Folgefahrt-Pulk zu befahren, d. h. hintereinander zu fahren und sich nicht gegenseitig zu überholen. Der erste Fahrer im Pulk sollte einem simulierten Führungsfahrzeug folgen, welches in den Prüfsituationen zu einem vordefinierten Zeitpunkt stark abbremste.

Weiterhin wurde eine Abstandsinstruktion gegeben, damit der Pulk zusammenblieb und eine Abhängigkeit zwischen den aufeinander folgenden Fahrern erzeugt wurde. Dies war notwendig, da mit freiem bzw. unbeeinflusstem Fahren die Untersuchungsfragestellungen nicht beantwortet werden konnten. Daher erhielten die Fahrer die Instruktion „halben Tacho einhalten“, welche bei Einhaltung zu einem Sekundenabstand von etwa zwei Sekunden führt (siehe auch Kapitel 6.3.6.1).

7.1.2.2 Gefahrenwarner

Der Gefahrenwarner warnte alle Fahrer zum selben Zeitpunkt bei bzw. vor starken Längsverzögerungen des simulierten Führungsfahrzeugs und damit auch vor erwarteten Bremsungen der ersten Fahrzeuge im Pulk. Die Warnung wurde für die Fahrer im Sinne eines kontaktanalogen Head-Up-Displays direkt in der Fahrszenarie dargestellt, indem über dem simulierten Führungsfahrzeug ein blinkendes Gefahrenzeichen eingeblendet wurde (siehe Abbildung 59 links). Insgesamt wurden zwei Auslegungen der Warnung sowie eine Situation ohne Warnung (siehe Abbildung 59 rechts) umgesetzt:

- „Frühe Warnung“: Das System warnt, wenn eine starke Längsverzögerung eines Vorderfahrzeugs zu erwarten ist. In der Simulation begann die Warnung 300 m und damit etwa 13 s vor der Bremsung des simulierten Führungsfahrzeugs. Nach der Bremsung blieb die Warnung noch für etwa 10 s eingeblendet.
- „Späte Warnung“: Das System warnt im Moment starker Längsverzögerungen eines Vorderfahrzeugs. Nach der Bremsung blieb die Warnung noch für etwa 10 s eingeblendet.
- „Ohne Warnung“: Das Führungsfahrzeug bremst ohne eine Warnung.

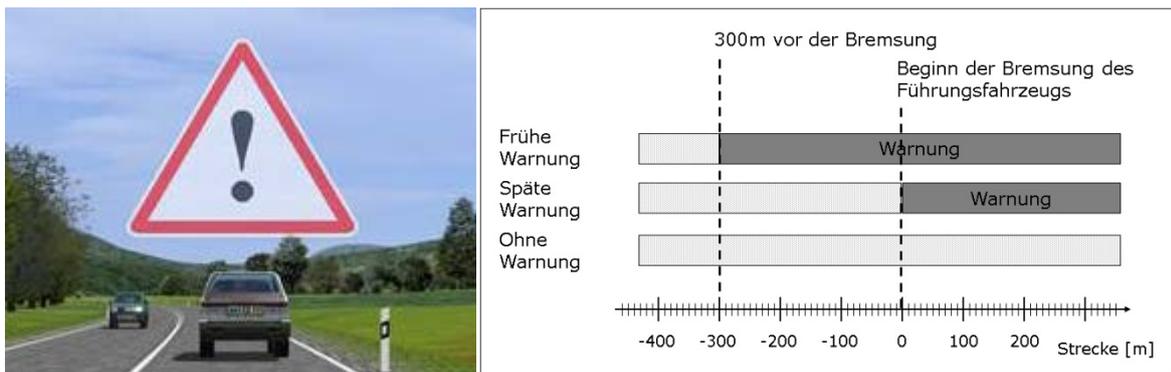


Abbildung 59: Blinkendes Gefahrenzeichen über dem simulierten Führungsfahrzeug (links). Grafische Darstellung der Prüfsituationen: Während der dunkelgrau hinterlegten Phasen erschien die Warnung (rechts).

7.1.2.3 Strecke

Insgesamt befuhren die Fahrer vier Landstraßenstrecken E, F, G und H in einem Folgefahrt-Pulk. Jede der Strecken bestand aus drei Abschnitten mit einer Länge von jeweils 2.6 km Länge (insg. 7.8 km). Zu Beginn eines jeden Abschnitts scherte ein simuliertes Fahrzeug

mittels einer Kreuzung vor das erste Fahrzeug des Pulk ein. Der Pulk folgte nun diesem Führungsfahrzeug, das mit einer konstanten Geschwindigkeit von 83 km/h fuhr.

Die Abschnitte waren entweder Prüf- oder Kontrollsituationen, die in einer nicht-systematischen Reihenfolge aufeinander folgten (siehe Tabelle 13):

- In Prüfsituationen bremste das Führungsfahrzeug zu einem vordefinierten Zeitpunkt mit einer Längsverzögerung von 20 m/s² auf 61 km/h ab. Anschließend beschleunigte es wieder auf die Ausgangsgeschwindigkeit von 83 km/h. Diese Prüfsituationen ereigneten sich insgesamt sechsmal während einer Versuchssitzung (jeweils zweimal „Frühe Warnung“, „Späte Warnung“ und „Ohne Warnung“).
- In Kontrollsituationen bremste das Führungsfahrzeug während des Streckenabschnitts nicht ab. Diese Kontrollsituationen ereigneten sich jeweils sechsmal während einer Versuchssitzung.

An der nächsten Kreuzung fuhr das Führungsfahrzeug von der Landstraße ab, worauf zu Beginn des nächsten Abschnitts ein anderes simuliertes Fahrzeug vor dem Pulk einscherte.

Tabelle 13: Übersicht über die Prüf- und Kontrollsituationen auf den vier Strecken A, B, C und D mit jeweils drei Abschnitten. Die Prüfsituationen sind kursiv hervorgehoben. In den Klammern steht jeweils der Streckenmeter der Bremsung.

		Abschnitt (jeweils 2600 m)		
		1	2	3
Strecke	E	<i>Bremsen (1230 m) mit später Warnung</i>	<i>Bremsen (1110 m) mit früher Warnung</i>	Kontrollsituation
	F	Kontrollsituation	<i>Bremsen (1230 m) mit später Warnung</i>	Kontrollsituation
	G	Kontrollsituation	<i>Bremsen (1000 m) ohne Warnung</i>	<i>Bremsen (1110 m) mit früher Warnung</i>
	H	Kontrollsituation	<i>Bremsen (1000 m) ohne Warnung</i>	Kontrollsituation

7.1.2.4 Versuchsplan

Die vier Strecken wurden in permutierter Reihenfolge gefahren. Vor jeder Fahrt wurde die Reihenfolge der vier Fahrer im Pulk getauscht, sodass jeder der Fahrer einmal an jeder Position (Erstes/Zweites/Drittes/Viertes Fahrzeug im Pulk) fuhr.

Die Verteilung der Prüfsituationen auf die Versuchsstrecken wird in Tabelle 13 dargestellt. Jede der Prüfsituationen „Frühe Warnung“, „Späte Warnung“ sowie „Ohne Warnung“ wurde somit von jedem Fahrer zweimal erlebt, allerdings an unterschiedlichen Positionen im Pulk.

7.1.2.5 Versuchsablauf

Nach dem Eintreffen der vier Fahrer erfolgte die Begrüßung und gegenseitige Vorstellung der Probanden. Danach konnten sich die Fahrer in einer kurzen Landstraßenstrecke an das Fahren in der Pulksimulation gewöhnen. Anschließend erfolgte die Instruktion der ersten Versuchsfahrt. Es wurde insbesondere hervorgehoben, dass als Abstandsregel „halber Tacho“ galt und nicht gegenseitig überholt werden durfte. Außerdem wurde die Funktion des Gefahrenwarners erklärt: „Der Gefahrenwarner zeigt durch ein blinkendes Ausrufezeichen an, dass mit Fehlern und unangepasstem Verhalten des Führungsfahrzeugs zu rechnen ist.“ Das Warnsymbol des Gefahrenwarners wurde hierbei durch eine vergrößerte Abbildung im DIN A3-Format zur Illustration gezeigt.

Vor jeder weiteren Fahrt tauschten die Probanden auf Anweisung des Versuchsleiters die Fahrstationen, da die Stationen den Positionen im Pulk fix zugeordnet sind und jeder Fahrer einmal an jeder Position fahren sollte. Nach Ende der vierten Fahrt wurden alle Probanden entlohnt und verabschiedet. Insgesamt dauerte der Versuch etwa 45 Minuten.

7.1.2.6 Erfasste Parameter

Für jedes Pulkfahrzeug wurden alle Parameter der Fahrzeugbedienung und des Fahrzeugmodells aufgezeichnet (siehe Kapitel 4.2). Darüber hinaus wurden vom simulierten Führungsfahrzeug Geschwindigkeit und Längsbeschleunigung erfasst.

Direkt im Anschluss an jede einzelne Prüfsituation wurden von den Fahrern subjektive Urteile mit Hilfe des LCD-Displays erhoben, welches hierbei als Touchpad verwendet wurde. Folgende Fragen wurden gestellt:

- Wie überraschend war diese Situation?
- Wie schwierig war diese Situation?
- Wie ärgerlich war diese Situation?

Die Fragen sollten auf einer sechsstufigen Skala von „gar nicht“ bis „sehr stark“ (siehe Abbildung 60) durch Drücken des entsprechenden Skalenfeldes beantwortet werden.

gar nicht	sehr wenig	wenig	mittel	stark	sehr stark
--------------	---------------	-------	--------	-------	---------------

Abbildung 60: Verwendete Skala der Online-Befragung.

7.1.2.7 Stichprobe

An der Untersuchung nahmen $N = 16$ Probanden (6 Frauen, 10 Männer) aus dem Testfahrerpanel des WIVW teil. Sie waren zwischen 23 und 40 Jahren alt, das mittlere Alter lag bei 30.8 Jahren ($SD = 4.9$). Alle Fahrer hatten zuvor bereits ein Training in der Pulksimulation (siehe Kapitel 5) absolviert und waren daher mit der Bedienung des Simulatorfahrzeugs vertraut.

7.1.3 Ergebnisse

Nach der Beschreibung der kompletten Prüfsituation werden die Fahrdaten im Folgenden getrennt nach zeitlichen Intervallen berichtet (siehe Abbildung 59 rechts). Zunächst wird das Intervall „vor der Bremsung“ (300 m vor der Bremsung bis zur Bremsung) betrachtet, um den Effekt der frühen Warnung zu bestimmen. Danach werden die Ergebnisse des Intervalls „nach der Bremsung“ (Bremsung bis 400 m nach der Bremsung) berichtet, um den Effekt der späten Warnung aufzuzeigen. Abschließend folgen die subjektiven Ergebnisse.

Für die Evaluation des Gefahrenwarners erfolgt pro Position ein Vergleich der drei Prüfsituationen „frühe Warnung“, „späte Warnung“ und „ohne Warnung“. Da die Fahrer nicht jede Prüfsituation an jeder Position im Pulk erlebten, liegen die Daten der einzelnen Prüfsituationen zum Teil abhängig und zum Teil unabhängig vor. Deshalb wird für diesen Vergleich eine unabhängige einfaktorielle ANOVA berechnet.

7.1.3.1 Beschreibung der Prüfsituation

Aufgrund der starken Verzögerung des Führungsfahrzeugs sind alle Fahrer zum Bremsen gezwungen. Derartige Situationen werden häufig in einem Linienvlaufplot der Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten dargestellt (siehe Abbildung 61 links für ein Beispiel). Die Methode der Pulksimulation ermöglicht mit Hilfe der in Kapitel 6.3.7 entwickelten Parameter zusätzlich eine Beschreibung des gesamten Pulks in dieser Situation: THW_{Pulk} und die Pulklänge verhalten sich analog zu den Geschwindigkeitsverläufen der Einzelfahrzeuge. Bremsen die Fahrzeuge aufgrund der Verzögerung des Führungsfahrzeugs ab, kommt es in den beiden Pulkparametern zu einem Einbruch im Verlauf: Zum einen schrumpft die Pulklänge und zum anderen sinkt der zeitliche Abstand zwischen dem letzten und dem ersten Fahrzeug im Pulk (siehe Abbildung 61 rechts für die Pulkparameter der in Abbildung 61 links dargestellten Situation).

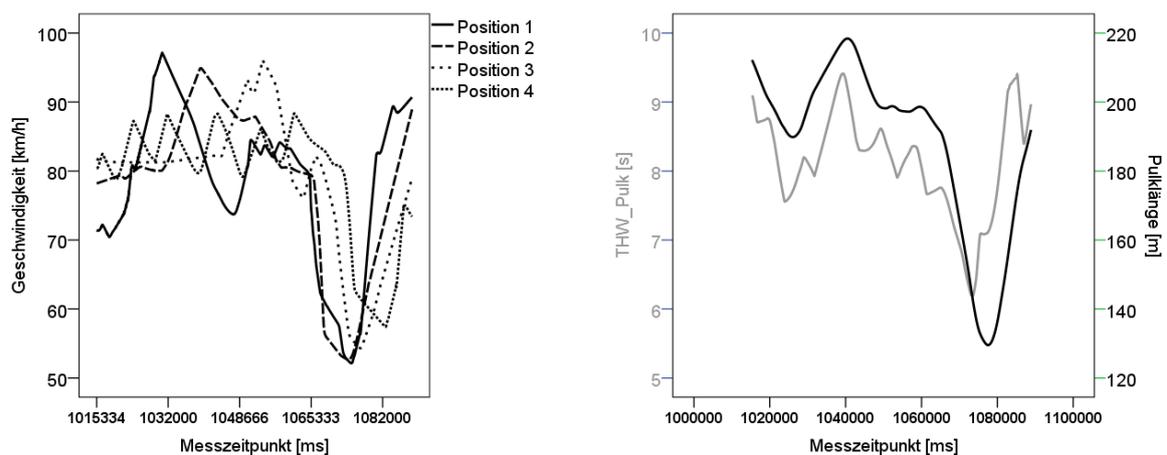


Abbildung 61: Geschwindigkeitsverläufe der vier Fahrer in einer Prüfsituation (links). THW_{Pulk} und Pulklänge für dieselbe Situation (rechts).

7.1.3.2 Vor der Bremsung

Lediglich die Fahrer auf der ersten Position reagieren auf die frühe Warnung, indem sie im Intervall zwischen früher Warnung und Bremsung des Führungsfahrzeugs die Geschwindigkeit im Mittel um etwa 5 km/h reduzieren ($F(2, 21) = 3.06$, $p = .070$, $\eta^2 = .23$; siehe Abbildung 62 links). Diese Verlangsamung geht mit einer Vergrößerung des zeitlichen Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug um durchschnittlich 0.7 s einher ($F(2, 21) = 8.04$, $p = .003$, $\eta^2 = .45$; siehe Abbildung 62 rechts). Auf den anderen Positionen finden sich im Gegensatz dazu keine Unterschiede zwischen den Prüfsituationen in diesem Intervall.

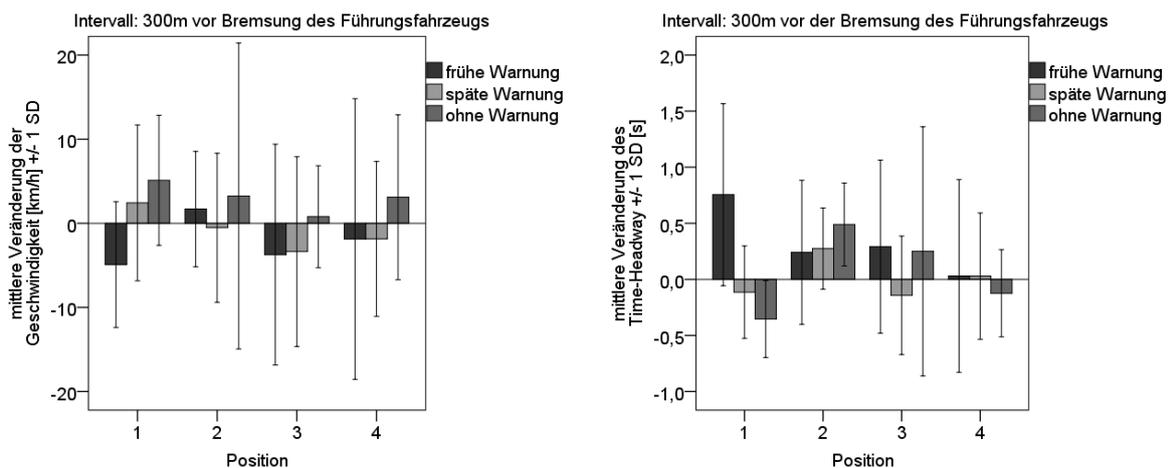


Abbildung 62: Veränderung der Geschwindigkeit (links) und des Time-Headways (rechts) im Intervall vor der Bremsung. Positive Werte bedeuten, dass Geschwindigkeit bzw. Abstand vergrößert werden. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

7.1.3.3 Nach der Bremsung

Die Abstandsvergrößerung aufgrund der frühen Warnung hat zur Folge, dass der erste Fahrer nach der Verzögerung des simulierten Führungsfahrzeugs weniger stark bremsen muss ($F(2, 21) = 3.26$, $p = .059$, $\eta^2 = .24$; siehe Abbildung 63 links), verglichen mit der späten Warnung bzw. der Situation ohne Warnung. Die hinteren Fahrer profitieren ebenfalls von der frühen Warnung, da auch sie weniger stark bremsen müssen ($F(2, 69) = 6.09$, $p = .004$, $\eta^2 = .15$). Der Nutzen der frühen Warnung steigt hierbei mit einer weiter hinten liegenden Position im Pulk an, da zunehmend geringere Bremsungen notwendig werden (siehe Abbildung 63 rechts oben).

Auch bei der späten Warnung steigt der Nutzen in den hinteren Positionen an. Die ersten beiden Fahrer dagegen zeigen vergleichbare bzw. leicht stärkere Bremsreaktionen als ohne Warnung (siehe Abbildung 63 links und rechts Mitte).

Im Vergleich der beiden Warnauslegungen tritt mit zunehmender Positionierung eine Annäherung in der frühen und späten Warnung auf (siehe Abbildung 63 rechts). Somit spielt es mit steigender Entfernung zum auslösenden Fahrzeug eine immer geringere Rolle, ob man die frühe oder späte Warnung erhält.

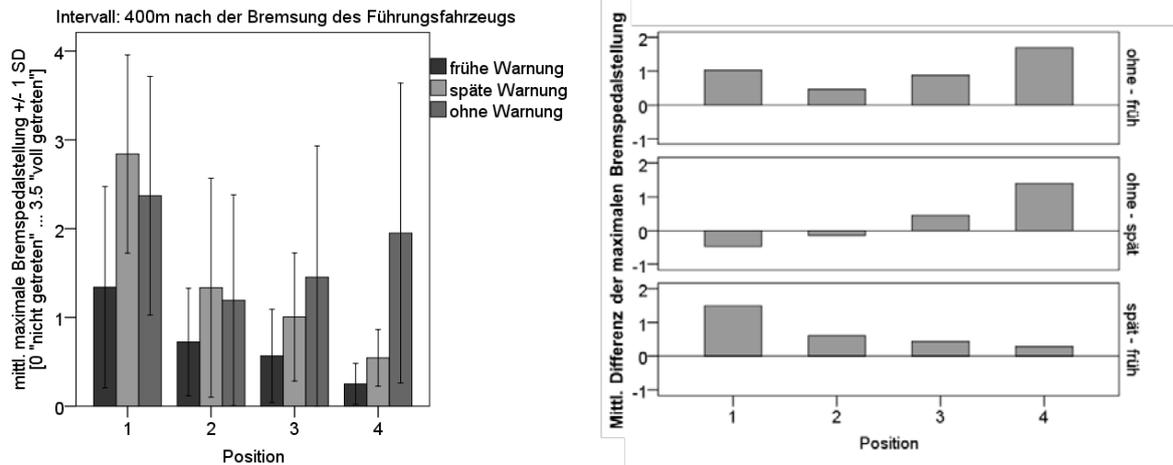


Abbildung 63: Maximale Bremspedalstellung im Intervall nach der Bremsung. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung (links). Differenz der Mittelwerte der mittleren maximalen Bremspedalstellung zwischen ohne Warnung und früher Warnung (rechts oben), ohne Warnung und später Warnung (rechts Mitte) sowie später und früher Warnung (rechts unten).

Betrachtet man die Geschwindigkeitsreduktion aufgrund der Bremsung, kann festgestellt werden, dass die Fahrer ohne Warnung über alle Positionen hinweg zwischen 24 und 32 km/h verlangsamen. Mit der späten Warnung sind aufgrund der leicht stärkeren Bremsungen des ersten Fahrers die Geschwindigkeitsreduktionen höher (30-40 km/h), während sie mit der frühen Warnung geringer sind (12-25 km/h; siehe Abbildung 64 links).

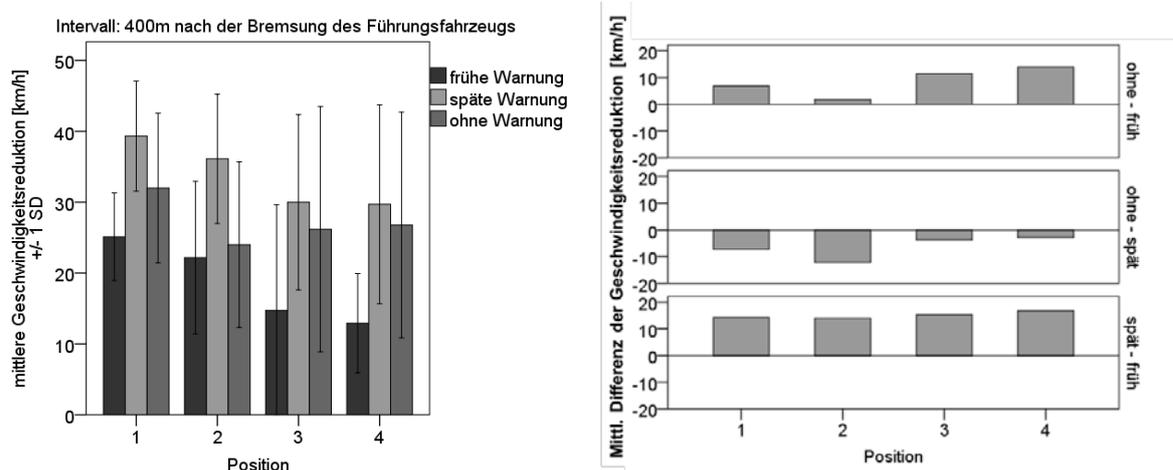


Abbildung 64: Geschwindigkeitsreduktion im Intervall nach der Bremsung. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung (links). Differenz der Geschwindigkeitsreduktion zwischen ohne Warnung und früher Warnung (rechts oben), ohne Warnung und später Warnung (rechts Mitte) sowie später und früher Warnung (rechts unten).

Auch bezüglich der Geschwindigkeitsreduktion profitieren die Fahrer mit früher Warnung insbesondere auf den hinteren Positionen (siehe Abbildung 64 rechts oben). Mit der späten Warnung dagegen muss auf den ersten beiden Positionen stärker verlangsamt werden, während dies in den hinteren Positionen vergleichbar zur Bedingung ohne Warnung ist (siehe Abbildung 64 rechts Mitte). Im Vergleich der beiden Warnalternativen wird mit der späten Warnung auf jeder Position etwa um 15 km/h stärker abgebremst als mit der frühen Warnung (siehe Abbildung 64 rechts unten).

Ob das bisher berichtete Fahrerverhalten in den einzelnen Bedingungen zu einem unterschiedlich häufigen Auftreten sicherheitskritischer Situationen führt, wird nun untersucht. Als Maß kann hierbei die TTC herangezogen werden. Van der Horst (1991) empfiehlt einen Wert von 4 s als Untergrenze für eine sichere Bremsung. Kleinere TTCs als 4 s führen dagegen zu unkomfortablen Bremsungen und können somit in einer sicherheitskritischen Situation resultieren. Bei der späten Warnung ereignen sich auf der ersten Position immer derartig kritische Situationen (siehe Abbildung 65), auf den hinteren Positionen nur noch in jeweils zwei von sechs Fällen. Mit der frühen Warnung treten insgesamt lediglich fünf potentiell sicherheitskritische Situationen auf. Ohne Warnung gibt es Häufungen kritischer TTCs auf der ersten und letzten Position im Pulk.

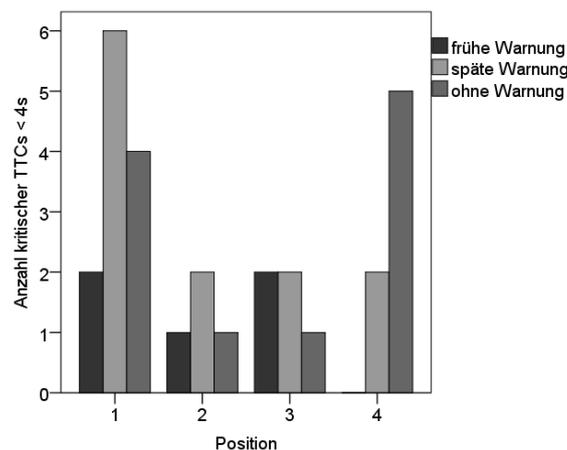


Abbildung 65: Anzahl kritischer TTCs < 4 s für Positionen und Bedingungen. Jede Prüfsituation ereignete sich pro Position sechs Mal, somit ist der maximal erreichbare Wert 6.

Nun wird geprüft, ob auch die Pulkparameter die Kritikalität der Situation wiedergeben können. Hierzu werden pro Prüfsituation die minimalen Werte von THW_{Pulk} und Pulklänge herangezogen. Es zeigen sich keine Unterschiede zwischen den Bedingungen für THW_{Pulk} ($F(2, 29) = 0.530$; $p = .594$; $\eta^2 = .04$; siehe Abbildung 66 links) und die Pulklänge ($F(2, 29) = 2.626$; $p = .089$; $\eta^2 = .15$; siehe Abbildung 66 rechts). Somit bilden die beiden Parameter nicht die Ergebnisse der Einzelfahrzeuge ab.

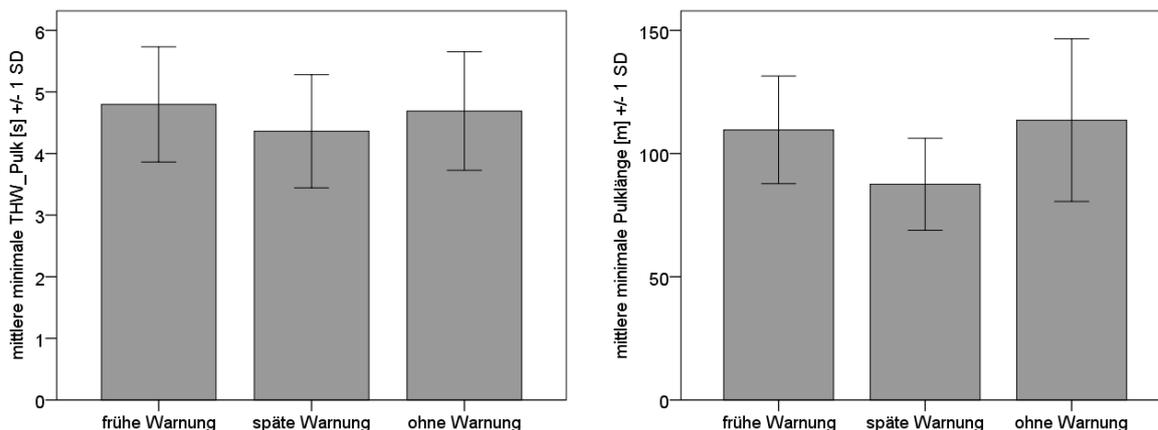


Abbildung 66: Minima von THW_{Pulk} (links) und der Pulklänge (rechts) für die zwei verwendeten Auslegungen des Gefahrenwarners und die Situation ohne Warnung. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

7.1.3.4 Subjektive Daten

Bezüglich der subjektiven Urteile ist ein Effekt auf der ersten Fahrerposition zu beobachten: Während sich die Fahrerangaben auf den hinteren Positionen für die einzelnen Prüfsituationen nicht unterscheiden, beurteilt der erste Fahrer die Situation mit der späten Warnung als ärgerlicher, verglichen mit der frühen Warnung bzw. ohne Warnung ($F(2, 21) = 4.14, p = .031, \eta^2 = .29$; siehe Abbildung 67).

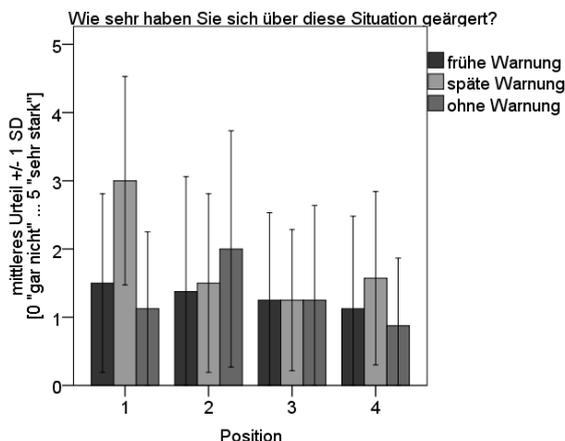


Abbildung 67: Fahrerurteile zu Ärger in der Situation für Positionen und Bedingungen. Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

7.1.4 Zusammenfassung und Diskussion

In dieser Studie wurde ein Gefahrenwarner evaluiert, der vor Bremsungen vorausfahrender Fahrzeuge warnen sollte. Entweder warnte das System die Fahrer des Folgefahrt-Pulks schon vor der Bremsung des Führungsfahrzeugs („frühe Warnung“) oder erst im Zeitpunkt dieser Bremsung („späte Warnung“).

Die frühe Warnung bringt für alle Fahrer im Pulk Vorteile. Durch sie vergrößert der erste Fahrer den Abstand zum Führungsfahrzeug noch vor dessen Bremsung und muss daher nicht so stark die Geschwindigkeit reduzieren. Aufgrund dessen müssen auch die hinteren Fahrer nicht so heftig bremsen wie im Fall ohne Warnung. Sicherheitskritische Situationen treten am Ende des Pulks überhaupt nicht mehr auf.

Die späte Warnung dagegen führt bei den ersten Fahrern des Pulks zu ähnlichen bzw. leicht stärkeren Bremsreaktionen im Vergleich zu Prüfsituationen ohne Warnung. Bei jedem Fahrer auf erster Position tritt eine potentiell sicherheitskritische TTC auf. Daher müssen auch die hinteren Fahrer ihre Geschwindigkeit stärker reduzieren. Allerdings haben die hinteren Fahrer den Vorteil, dass sie nicht so heftig abbremsen müssen wie im Fall ohne Warnung.

Die Fahrer auf erster Position mit später Warnung ärgern sich stärker über die Situation als in den anderen Bedingungen. Es ist anzunehmen, dass der erste Fahrer eine Warnung im Moment der Bremsung nicht für notwendig hält, da sie zeitgleich mit den Bremslichtern des Führungsfahrzeugs erscheint. Verbunden mit dem Befund, dass die späte Warnung zu keinerlei Abschwächungen der Kritikalität der Fahrsituation führt, erfordert dies eine besondere Ausgestaltung der Warnstrategie: Fahrer direkt hinter dem auslösenden Fahrzeug sollten nicht gewarnt werden, während die dahinter folgenden Fahrer die Warnung erhalten sollten. Inwieweit diese Empfehlung auch unter nicht-optimalen Fahrerzuständen wie z. B. Ablenkung oder Müdigkeit gültig ist, bleibt in weiteren Studien zu untersuchen.

Im direkten Vergleich der beiden Warnungen schneidet die frühe Warnung bei den vorderen Fahrern im Pulk somit besser ab. Mit zunehmendem Abstand zum auslösenden Führungsfahrzeug dagegen gleichen sich die Effekte der beiden Warnauslegungen aneinander an: In den hinteren Positionen profitieren die Fahrer von beiden Warnstrategien in ähnlichem Maße gegenüber dem Fahren ohne Warnung.

Der Mehrwert der Pulksimulation zeigt sich in dieser Studie, da durch diese Prüfanordnung der Nutzen des Systems in Abhängigkeit der unterschiedlichen Positionierung im Pulk identifiziert werden kann. Durch die Pulksimulation kann die Auswirkung des Gefahrenwarners auf mehrere direkt oder indirekt betroffene Fahrer gleichzeitig betrachtet werden. Natürlich könnte auch in der Einzelfahrsimulation eine ähnliche Anordnung geprüft werden, bei der der Proband an verschiedenen Positionen in einer Kolonne fahren würde. Jedoch würden die umgebenden Fahrzeuge aus Modellen mit eingeschränkt realistischem Reaktions- und Verzögerungsverhalten bestehen, was die Ergebnisse stark beeinflussen würde. In der Verkehrssimulation fehlen Probanden komplett und die Ergebnisse sind ausschließlich von der Güte der Modelle abhängig. Darüber hinaus sind subjektive Angaben wie z. B. zu Ärger in einer Fahrsituation nicht zu erfassen.

7.2 Evaluierung eines Ampelphasenassistenten⁹

7.2.1 Fragestellung

Im Gegensatz zur vorherigen Studie, in der mit dem Gefahrenwarner ein Car-to-Car-basiertes Fahrerassistenzsystem zur Erhöhung von Fahrsicherheit betrachtet wurde, untersucht die nun berichtete Studie mit dem Ampelphasenassistenten ein Car-to-Infrastructure-basiertes Fahrerassistenzsystem zur Steigerung der Fahreffizienz. Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprojekts sim^{TD} durchgeführt.

Der Ampelphasenassistent informiert den Fahrer während der Annäherung an eine Lichtsignalanlage über die optimale Geschwindigkeit, um diese ohne Halt bei Grün durchfahren zu können. Hierfür berechnet die zur Lichtsignalanlage gehörige sogenannte „Road Side Unit“ eine Prognose der Ampelschaltung und verschickt diese an das annähernde Fahrzeug. Dieses berechnet aus den empfangenen Daten und den eigenen Fahrzeugdaten (z. B. Geschwindigkeit, Position) die Informationen für den Fahrer. Kann eine Ampel nicht bei Grün erreicht werden, wird die verbleibende Zeit bis zur nächsten Grünphase dargestellt.

Da Fahrer bei Befolgung der Systemempfehlungen seltener bzw. möglicherweise gar nicht mehr an roten Ampeln anhalten müssen und jedes Anhalten und Neuanfahren mit einem zusätzlichen Spritverbrauch einhergeht, soll der Ampelphasenassistent zu einem ökonomischeren Fahren beitragen. Weiterhin sollen Zeitverzögerungen durch verspätetes Anfahren an Ampeln verringert und somit der Verkehrsfluss effizienter gestaltet werden. Allerdings ist fraglich, ob Fahrer ein derartiges System überhaupt befolgen. Möglicherweise möchten Fahrer gar nicht langsamer als die erlaubte Geschwindigkeit fahren, da sie die Befürchtung haben, andere Fahrer zu behindern oder zu verärgern.

Bei Einführung des Ampelphasenassistenten auf den Markt ist mit geringen Ausstattungsraten zu rechnen, die sich erst im Laufe der Jahre erhöhen werden. Daher stellt sich zusätzlich die Frage, ab welchem Grad der Ausstattung ein derartiges System Wirkungen erzielt. Weiterhin interessiert, inwiefern nicht-assistierte Fahrer durch Fahrer mit System beeinflusst werden: Möglicherweise profitieren diese Fahrer, da der Verkehrsstrom der Ampelphase angepasst wird und somit ein effektiverer Verkehrsfluss entsteht. Zum anderen sind jedoch auch negative Effekte denkbar, da sich die nicht-assistierte Fahrer durch vorausfahrende ausgestattete Fahrzeuge (deren Fahrer aufgrund der Systemempfehlungen geringere Geschwindigkeiten einhalten) behindert fühlen könnten.

⁹ Die hier berichteten Daten wurden unter anderem im Rahmen einer Bachelorarbeit (Stumpf, 2012) erhoben. Die Ideen zur Versuchsplanung und -durchführung entstammen vom Autor der vorliegenden Arbeit. Die hier dargestellten Daten wurden neu ausgewertet, neu dargestellt und nicht aus der Arbeit von Stumpf (2012) entnommen.

In dieser Studie wird daher analysiert, ob die erhofften positiven Effekte hinsichtlich Effizienz tatsächlich auftreten und inwiefern Fahrer das System überhaupt befolgen. Ein Einfluss der Ausstattungsrate wird zusätzlich betrachtet. Außerdem wird die Akzeptanz des Systems untersucht. Die Pulksimulation ist für die Klärung dieser Fragestellungen gut geeignet, da hier Interaktionen zwischen mehreren Fahrern und die damit einhergehenden sozialen Effekte wie Rücksichtnahme (z. B. keine Systembefolgung, da man andere nicht behindern möchte) oder Verärgerung (z. B. über langsam vorausfahrende Fahrer) erhoben werden können. Zusätzlich können verschiedene Ausstattungsraten des Ampelphasenassistenten mit mehreren Probanden realisiert und die hierbei entstehenden Effekte analysiert werden.

7.2.2 Methodik

7.2.2.1 Ampelphasenassistent

Der Ampelphasenassistent, dessen Anzeigen den Fahrern auf dem separaten LCD-Display (siehe Kapitel 4.1) dargeboten wurden, besitzt zwei Funktionen:

- (1) „Grüne Welle“: Hat der Fahrer eine Chance, die Ampel bei Grün zu durchfahren, wird ihm die dafür optimale Geschwindigkeit angezeigt (siehe Abbildung 68 links). Befolgt der Fahrer diese Geschwindigkeit, kann er die Ampel ohne anhalten zu müssen passieren.
- (2) „Restrotanzeige“: Hat der Fahrer dagegen keine Chance, die Ampel bei Grün zu durchfahren, wird ihm die Zeit bis zum nächsten Wechsel nach Grün in Sekunden angezeigt (siehe Abbildung 68 rechts).

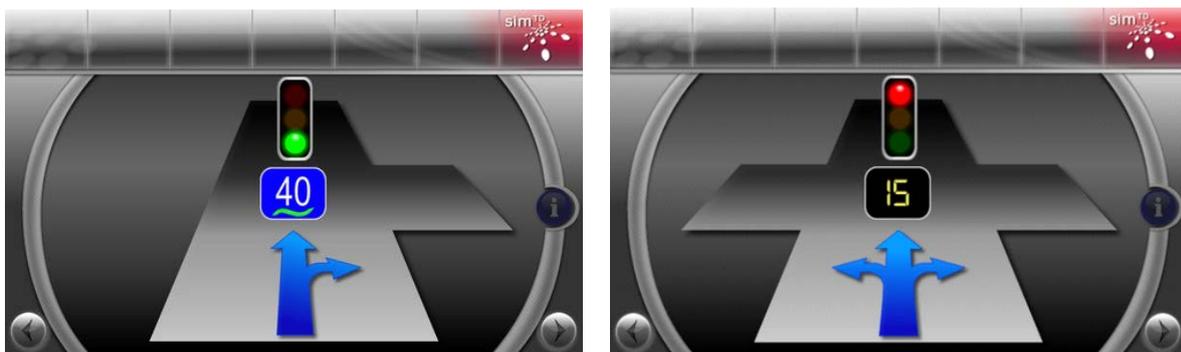


Abbildung 68: Grüne Welle (links): In diesem Beispiel würde der Fahrer die Ampel mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h bei Grün erreichen. Restrotanzeige (rechts): In diesem Beispiel wechselt die Ampel in 15 s zu Grün.

Die beiden Funktionen des Ampelphasenassistenten wurden in eine Anzeige integriert, in der die Empfehlungen der grünen Welle sowie Restrotzeiten für alle möglichen Fahrtrichtungen bei der nächsten Ampel dargestellt wurden. Die durch das Navigationssystem vorgegebene Fahrtrichtung wurde mit einem blauen Pfeil hervorgehoben (siehe Abbildung 69).



Abbildung 69: Integrierte Darstellung der grünen Welle und der Restrotanzeige in einer Anzeige. Die Pfeile nach links, rechts sowie geradeaus gelten für die drei möglichen Fahrtrichtungen. Der blaue Pfeil kennzeichnet die vom Navigationssystem vorgegebene Fahrtrichtung.

Die Anzeige des Ampelphasenassistenten erschien jeweils 300 m vor Erreichen der nächsten Ampel. Während der Ampelannäherung passte das System seine Anzeige an die jeweils aktuelle Geschwindigkeit an. So änderte sich die Anzeige der optimalen Geschwindigkeit bzw. wechselte zur Restrotanzeige, wenn die vorgegebene Geschwindigkeit nicht eingehalten wurde. Die Anzeige war in 5 km/h-Schritten abgestuft, beginnend bei 30 km/h (30 km/h, 35 km/h, 40 km/h, 45 km/h, 50 km/h).

7.2.2.2 Versuchsplan

An jeder Versuchssitzung nahmen vier Fahrer teil. Der Ampelphasenassistent wurde genauso wie die Ausstattungsrate innerhalb eines Pulks als unabhängiger Faktor realisiert. Insgesamt wurden fünf Ausstattungsraten umgesetzt:

- 0 %: Kein Fahrer erhält Anzeigen des Ampelphasenassistenten
- 25 %: Ein Fahrer erhält Anzeigen des Ampelphasenassistenten, drei dagegen nicht
- 50 %: Zwei Fahrer erhalten Anzeigen des Ampelphasenassistenten, zwei dagegen nicht
- 75 %: Drei Fahrer erhalten Anzeigen des Ampelphasenassistenten, einer dagegen nicht
- 100 %: Vier Fahrer erhalten Anzeigen des Ampelphasenassistenten

Jede Ausstattungsrate wurde in drei Versuchssitzungen durchgeführt, sodass jede Rate an $n = 12$ Probanden untersucht wurde. Insgesamt nahmen $N = 60$ Probanden am Versuch teil

7.2.2.3 Versuchsstrecke

Die Strecke führte durch eine Innenstadt und bestand aus verschiedenen in der Streckengeometrie gleich aufgebauten Abschnitten, die direkt hintereinander befahren wurden. Um negative Einflüsse durch Monotonie zu verringern, wurden die Abschnitte bezüglich der Bepflanzung und Bebauung möglichst unterschiedlich gestaltet. Jeder Abschnitt war wiederum in die drei Segmente (1) Ampelanfahrt, (2) Kreuzungsbereich und (3) Zusammenführung gegliedert (siehe Abbildung 70).

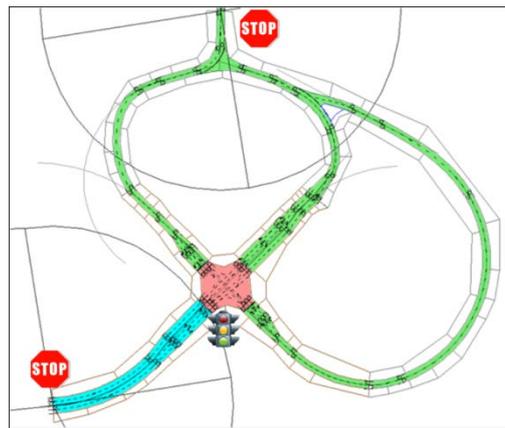


Abbildung 70: Schematische Darstellung eines Abschnitts. Farblich markiert sind die verschiedenen Streckensegmente Ampelanfahrt (blau), Kreuzungsbereich (rot) und Zusammenführung (grün).

Im Folgenden werden die drei Segmente näher beschrieben:

- (1) Ampelanfahrt: Die Ampelanfahrt bestand aus einer ca. 400 m langen Strecke ohne Abzweigungen. Zwölf Anfahrten waren einspurig (siehe Abbildung 71 links) und sechs Anfahrten bestanden aus jeweils zwei Fahrstreifen (siehe Abbildung 71 rechts).

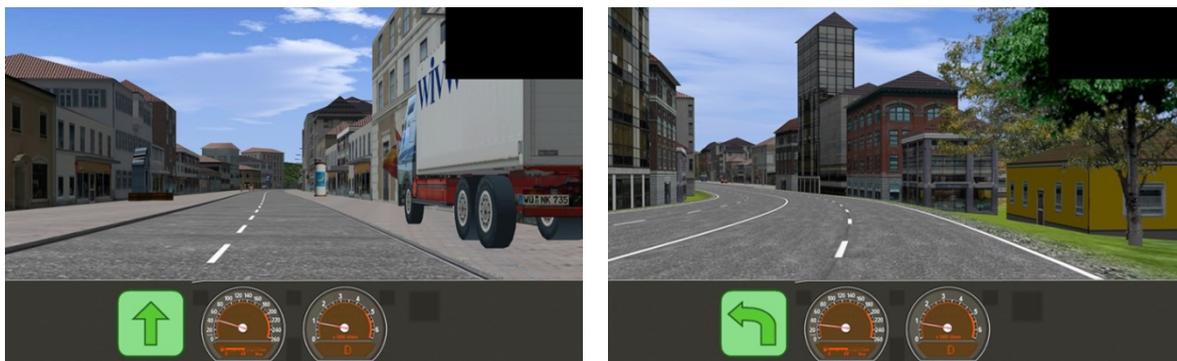


Abbildung 71: Ampelanfahrt aus Sicht des Fahrers an erster Position für einspurige (links) und zweispurige Anfahrten (rechts).

Jede Ampelanfahrt begann an einem Stoppschild. An diesem warteten die Fahrer hintereinander in Kolonnenformation, bis der Versuchsleiter über Mikrofon das Zeichen zum Losfahren gab. Nach 100 m Fahrt erschien in der Experimentalgruppe die erste Meldung des Ampelphasenassistenten. Nach weiteren 200 m konnten die Fahrer die Ampel erblicken, die wiederum 100 m entfernt an der Kreuzung stand (siehe Abbildung 72). In der späteren Auswertung wurde die Ampelanfahrt nochmals in zwei Bereiche untergliedert:

- Auswertebereich 1: Umfasst den kompletten Bereich der Systemaktivität (300 m vor der Ampel bis zur Ampel).
- Auswertebereich 2: Umfasst den Bereich der Systemaktivität, in dem die Ampel noch nicht gesehen werden kann und in dem das Fahren in der Kontrollgruppe somit unabhängig von der Ampel ist (300 m bis 100 m vor der Ampel).

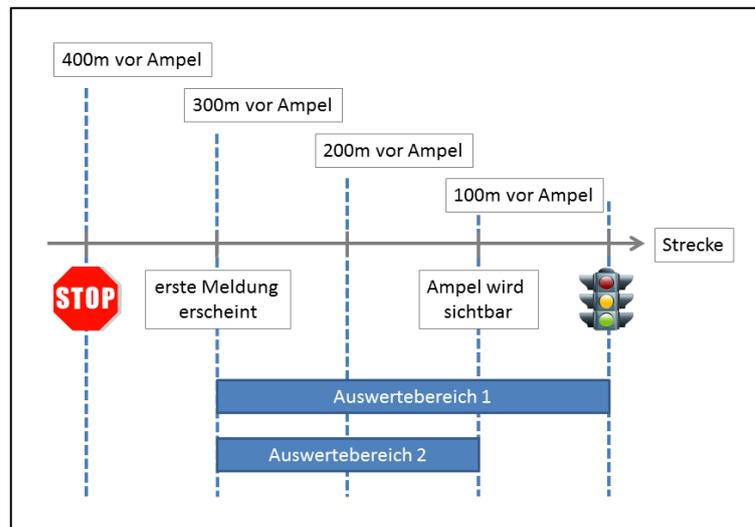


Abbildung 72: Grafische Darstellung der Auswertebereiche der Ampelanfahrt.

- (2) Kreuzungsbereich: Hier folgten die Fahrer den im Kombiinstrument eingblendeten Navigationshinweisen und der Pulk trennte sich (siehe Abbildung 73 links). Während zwei Fahrer nach rechts oder links abbogen, fuhren die anderen beiden Fahrer geradeaus weiter. Eine Übersicht, an welcher Kreuzung welcher der vier Fahrer in welche Richtung abbiegen musste, findet sich im Anhang in Tabelle 16.
- (3) Zusammenführung: Hier wurden die Fahrer wieder auf dieselbe Strecke zusammengeführt. An einem Stoppschild mit dem Zusatztext „Auf Instruktion warten“ (siehe Abbildung 73 rechts) warteten die Fahrer, bis der Pulk wieder komplett vereint war. Nach kurzem Signal der Versuchsleitung über Mikrofon konnten die Fahrer weiterfahren und die nächste Ampelanfahrt begann.



Abbildung 73: Kreuzungsbereich aus Sicht des Fahrers an erster Position (links). Stoppschilder mit Zusatztext „Auf Instruktion warten“ (rechts).

Durch die Streckengestaltung, die verschiedenen Routenführungen der vier Fahrer sowie den Wechsel von ein- und zweispurigen Anfahrten wurde erreicht, dass sich $n = 52$ der $N = 60$ Fahrer (86.7 %) mindestens einmal auf jeder der vier Positionen einer Ampel annäherten. Eine Übersicht, welcher Fahrer wie häufig an jeder Position fuhr, ist im Anhang in Tabelle 17 dargestellt.

Bei den einspurigen Strecken wurde in etwa 40 % der Fälle zu Beginn der Ampelanfahrt 50 km/h als empfohlene Geschwindigkeit dargeboten. Die anderen Anzeigen bewegten sich zwischen 10 und 20 % (siehe Abbildung 74 links). Auf zweispurigen Straßen erschien die 50 km/h-Anzeige in circa 70 % und die Restrotanzeige in knapp 20 % der Fälle (siehe Abbildung 74 rechts). Da Meldungen zwischen 30 und 45 km/h somit auf zweispurigen Strecken kaum aufgetreten sind, wird auf eine Darstellung dieser Ergebnisse im Folgenden zugunsten einer übersichtlicheren Darstellung der einspurigen Abschnitte verzichtet.

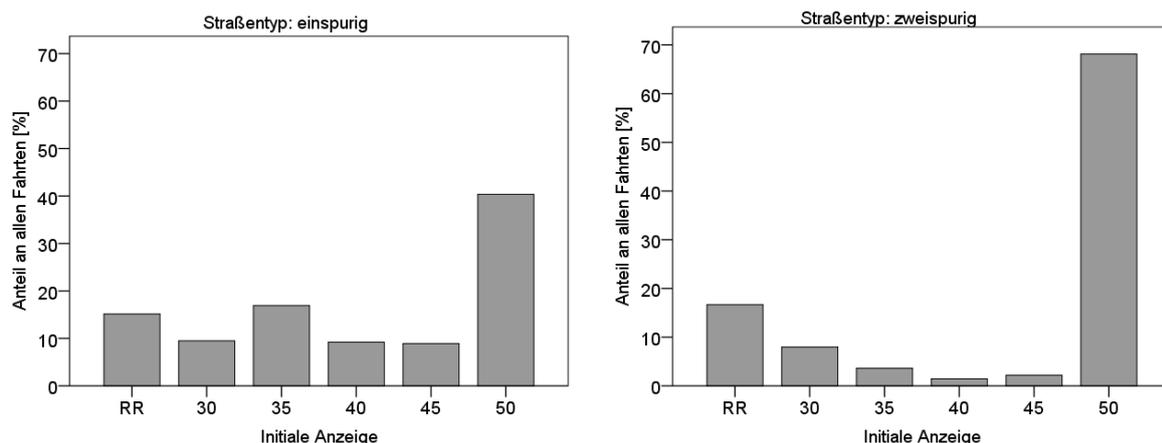


Abbildung 74: Häufigkeiten der Anzeigen des Ampelphasenassistenten zu Beginn der Ampelanfahrt (RR=Restrotanzeige).

7.2.2.4 Versuchsablauf

Nachdem alle vier Fahrer in den Räumlichkeiten des Instituts erschienen waren, wurden sie zunächst unabhängig voneinander einzeln im Simulatorraum instruiert.

Den Fahrern der Experimentalgruppe wurde zunächst der Ampelphasenassistent anhand von Screenshots der Anzeige (siehe Abbildung 68 und Abbildung 69) erklärt. Anschließend wurden die Fahrer gebeten, während der kommenden Fahrt immer dann die linke Lenkradwippe (siehe Abbildung 7 Mitte) zu ziehen, wenn sie von anderen Fahrern verärgert oder genervt waren, z. B. da vorausfahrende Fahrer langsamer als gewünscht fuhren und so zu einer Behinderung beitrugen. Den Fahrern wurde versichert, dass die anderen Fahrer die Wippenbenutzung während der Fahrt nicht mitbekämen und dies auch nicht im Anschluss an die Fahrt mitgeteilt würde. Daraufhin befuhren die Fahrer alleine einen Streckenabschnitt, um das Assistenzsystem, den Streckenverlauf und die Navigationshinweise kennenzulernen. Abschließend wurde den Fahrern mitgeteilt, dass auch die anderen Fahrer dieses System besitzen könnten. Allerdings bestünde ebenso die Möglichkeit, dass diese gar kein System oder ein anderes Assistenzsystem während der Fahrt hätten. Die Fahrer wurden gebeten, sich mit den anderen Probanden nicht über die soeben erhaltene Fahreranweisungen oder das Assistenzsystem zu unterhalten, da es auch im realen Straßenverkehr kein Wissen über Ausstattung und Motive anderer Fahrer gäbe.

Die Fahrer der Kontrollgruppe wurden instruiert, die Strecke zügig zu befahren und an Ampeln möglichst selten bei „rot“ anhalten zu müssen. Anschließend erfolgte die Einweisung in die Lenkradwippe mit der Bitte, diese in negativ erlebten Situationen zu verwenden. In einer kurzen Fahrt wurden daraufhin der Streckenverlauf und die Navigationshinweise kennengelernt. Schließlich wurden diese Fahrer genauso wie die Experimentalgruppe gebeten, nicht mit den anderen Versuchsteilnehmern über ihre Anweisung zu sprechen.

Anschließend erfolgte die Versuchsfahrt. Nach der Fahrt wurde eine geschlossene Fahrtbefragung durchgeführt. Zudem erhielten die Fahrer eine den Gruppen angepasste offene Situationsbewertung sowie die Fahrer der Experimentalgruppe eine geschlossene Systembeurteilung.

Insgesamt hatte der Versuch eine Länge von zwei Stunden. Für ihre Teilnahme erhielten die Probanden eine Aufwandsentschädigung.

7.2.2.5 Erfasste Parameter

Für jedes Pulkfahrzeug wurden alle Maße der Fahrzeugbedienung und des Fahrzeugmodells aufgezeichnet (siehe Kapitel 4.2). Weiterhin wurde die Nutzung der Lenkradwippe erfasst.

Vom Versuchsleiter wurde ein Beobachtungsprotokoll geführt, um auffällige Ereignisse festhalten zu können (z. B. Durchfahren der Ampel bei Rot und Kommentare einzelner Probanden). Darüber hinaus wurden verschiedene Befragungsverfahren eingesetzt:

- In der geschlossenen Fahrtbefragung wurden verschiedene Aspekte der Fahrt (z. B. Anstrengung, Spaß, Fahreffizienz) von allen Fahrern abgefragt. Die Fragen wurden anhand der 16-stufigen Kategorienunterteilungsskala bewertet (siehe Kapitel 5.2.5).
- Die geschlossene Befragung zur Systembeurteilung wurde ausschließlich der Experimentalgruppe vorgelegt und fragt zu jeder Systemanzeige (Grüne Welle, Restrotanzeige) nach Akzeptanz, Beanspruchung, Fahrsicherheit, Fahreffizienz und Ablenkung.
- In der offenen Situationsbewertung sollten Fahrer der Experimental- und der Kontrollgruppe Situationen schildern, in denen man sich über andere Fahrer geärgert hatte. Zusätzlich wurde die Experimentalgruppe gebeten, detaillierte Angaben zur Nützlichkeit des Systems zu geben.

7.2.2.6 Stichprobe

An der Studie nahmen $N = 60$ Personen aus dem Testfahrerpanel des WIVW teil. Die Probanden hatten zuvor bereits ein Training in der Pulksimulation (siehe Kapitel 5) absolviert und waren daher mit der Bedienung des Simulationsfahrzeugs vertraut. Der Anteil an Männern bzw. Frauen war mit jeweils $n = 30$ Personen gleich groß. Das Alter der Probanden lag zwischen 21 und 65 Jahren mit einem mittleren Alter von $M = 36.5$ ($SD = 12.9$).

7.2.3 Ergebnisse

Aufgrund des in Kapitel 7.2.2.2 beschriebenen Versuchsplans sind die verschiedenen Kombinationen aus Systemausstattung und Ausstattungsrate jeweils mit einer unterschiedlichen Anzahl an Probanden besetzt. Diese reicht von $n = 0$ bis $n = 12$ Probanden pro Zelle (siehe Abbildung 75 links). Dies ist bei Auswertung und Betrachtung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

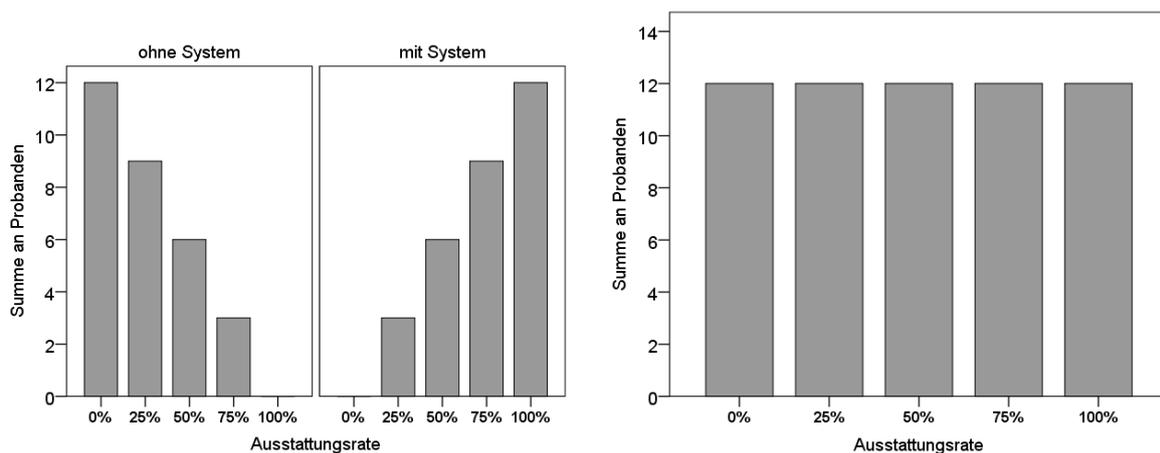


Abbildung 75: Grafische Darstellung der Stichprobengrößen pro Kombination aus Systemausstattung und Ausstattungsrate (links) sowie pro Ausstattungsrate (rechts).

Aufgrund der ungleichen Zellenbesetzung ist keine Berechnung von Wechselwirkungen möglich. Daher wird in der inferenzstatistischen Auswertung ein unvollständiges ANOVA-Modell verwendet, welches nur Haupteffekt-Parameter und keine Interaktionsparameter enthält (Howell, 2011). Es werden ausschließlich die Haupteffekte „System“ und „Ausstattungsrate“ inferenzstatistisch betrachtet. Die Interaktion wird bei Bedarf lediglich deskriptiv beschrieben.

In der grafischen Darstellung dieser Effekte wird ein geteiltes Balkendiagramm verwendet (siehe Abbildung 75 links als Beispiel). Hier kann zum einen der Haupteffekt „System“ abgeschätzt und zum anderen die Interaktion betrachtet werden. Allerdings ist eine Abschätzung von Effekten der Ausstattungsrate schwierig, da aufgrund der ungleichen Zellenbesetzungen die Mittelwerte der beiden Bedingungen mit und ohne System nicht wie üblich arithmetisch gemittelt werden dürfen, sondern diese Mittelung gewichtet erfolgen muss. Aus diesem Grund wird die Ergebnisdarstellung zusätzlich mit einem weiteren Balkendiagramm mit den Mittelwerten der Ausstattungsrate (siehe Abbildung 75 rechts als Beispiel) ergänzt.

7.2.3.1 Fahrerurteile zu Akzeptanz und Befolgung des Systems

Insgesamt wird der Ampelphasenassistent von den Fahrern der Experimentalgruppe als mittel bis positiv beurteilt (siehe Abbildung 76 links). So wird die Anzeige von den meisten Probanden als hilfreich bewertet und ihr wird in höherem Maße vertraut. Der Effekt bezüglich eines ökonomischeren Vorankommens wird allerdings nur als mittel bewertet. Fragt man die Fahrer, ob sie sich ein solches System in ihrem eigenen Fahrzeug wünschen, fällt das Urteil sehr differenziert aus: Einige Fahrer lehnen dies stark ab, während andere diesem Wunsch stark zustimmen.

Im Mittel geben die Fahrer an, stets versucht zu haben, die Anzeigen des Systems zu befolgen. Nahezu alle Fahrer sind sich bewusst, durch Befolgen der Anzeige andere Fahrer behindert zu haben. Dementsprechend haben viele Fahrer ihren Angaben nach die Anzeigen nicht befolgt, wenn sie dadurch andere Fahrer behindert hätten (siehe Abbildung 76 rechts). Auch in der offenen Befragung gaben $n = 15$ Fahrer an, dass sie nicht bzw. nur ungern andere Fahrer behindert hätten (z. B. „Ich hatte öfter ein schlechtes Gewissen, wenn ich zu langsam fuhr.“).

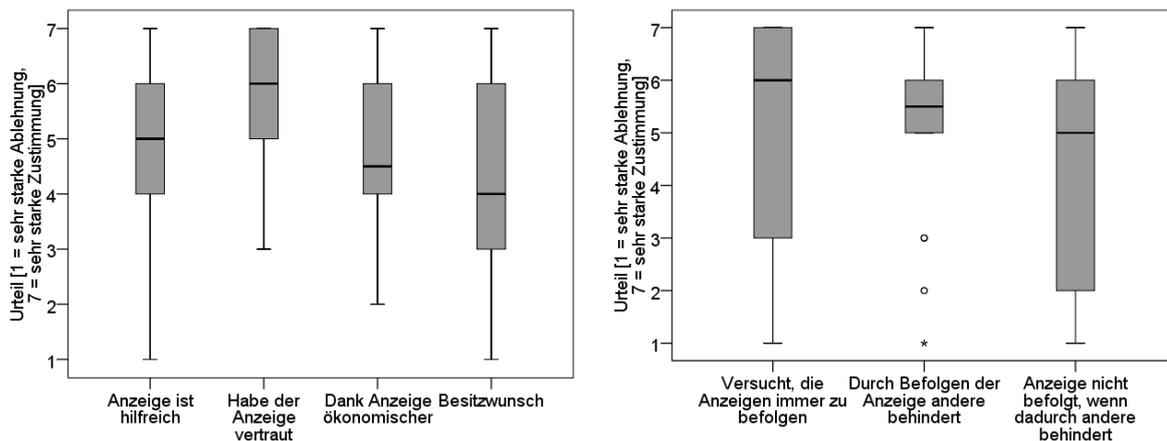


Abbildung 76: Urteile der Fahrer hinsichtlich Akzeptanz (links) und Befolgung (rechts) der Systemanzeigen. Dargestellt sind Boxplots.

7.2.3.2 Einflüsse auf die Effizienz

Das primäre Ziel des Ampelphasenassistenten ist, ein Anhalten an roten Ampeln zu verhindern und dadurch zu einem ökonomischeren Verkehrsfluss beizutragen. Ein Maß hierfür ist die Durchfahrwahrscheinlichkeit, welche den Prozentsatz an Fahrten ohne Halt an der Gesamtzahl aller Ampelannäherungen bezeichnet. Es zeigt sich, dass Fahrer mit System seltener an roten Ampeln anhalten müssen ($F(1, 54) = 15.97, p < .001, \eta^2 = .23$; siehe Abbildung 77 rechts). Ein Effekt der Ausstattungsrate ist dagegen nicht zu beobachten ($F(4, 54) = 1.22, p = .315, \eta^2 = .08$; siehe Abbildung 77 links).

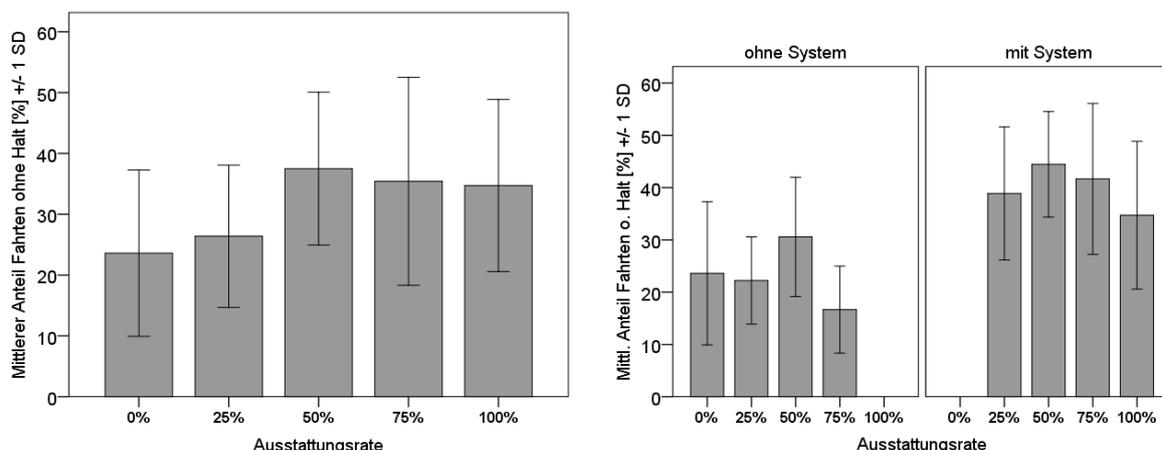


Abbildung 77: Anteile an Fahrten ohne Halt für Ausstattungsraten (links) sowie für System und Ausstattungsrate (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Ob ein Fahrer mit Ampelphasenassistent die Kreuzung ohne einen Halt überqueren konnte, war abhängig von der Systemanzeige. Im Folgenden wird untersucht, welche initiale Anzeige (d. h. diejenige Anzeige, die der Fahrer als erstes während der Ampelanfahrt etwa 300 m vor der Ampel erhält) welche Erfolgsquote (d. h. Wahrscheinlichkeit für Fahrt ohne Halt) hatte.

Wie in Abbildung 78 links zu sehen ist, sind Fahrten ohne Halt bei Anzeigen im mittleren Geschwindigkeitsbereich (35 bis 45 km/h) am wahrscheinlichsten. Insbesondere bei einer Anzeige von 40 km/h ist die Erfolgsquote hoch – hier gelingt es den Fahrern in 88 % der Fälle, eine grüne Ampel zu erreichen. Die Anzeige geringer (30 km/h) bzw. hoher Geschwindigkeiten (50 km/h) führt dagegen eher selten zu einem direkten Durchfahren einer Ampel.

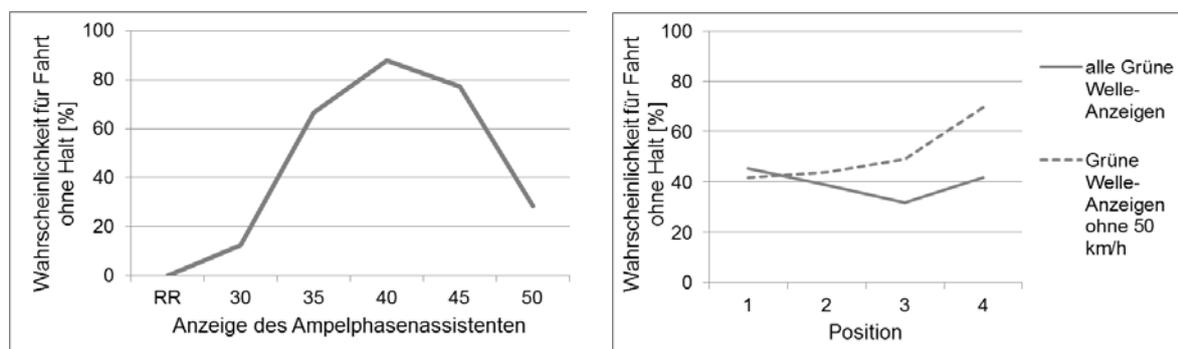


Abbildung 78: Durchfahrwahrscheinlichkeit für eine Fahrt ohne Halt pro Anzeige (links). Durchfahrwahrscheinlichkeit pro Position für alle Anzeigen bzw. alle Anzeigen mit Ausnahme von 50 km/h (rechts).

Diese zum Teil geringen Wahrscheinlichkeiten für das Erreichen einer grünen Ampel lassen darauf schließen, dass das System nicht immer genutzt wird. Es ist hierbei möglich, dass die Fahrer es nicht nutzen möchten oder es aufgrund des vorausfahrenden Verkehrs nicht nutzen können. Ein Vergleich der einzelnen Positionen im Pulk kann bei dieser Frage helfen (siehe Abbildung 78 rechts). Insgesamt beträgt die Erfolgsquote bei Position 1 45 %. Die anderen Position schneiden dagegen ein wenig schlechter ab (Position 2: 39 %; Position 3: 32 %; Position 4: 42 %). Allerdings wird dieses Ergebnis durch die hohe Durchfahrwahrscheinlichkeit der ersten Position bei Geschwindigkeitsempfehlungen von 50 km/h, welche wesentlich häufiger aufgetreten sind als andere Anzeigen (siehe Abbildung 74 links), stark beeinflusst. Diese ist auf Position 1 mit 59 % nahezu doppelt so hoch wie auf den hinteren Positionen (siehe Abbildung 79).

Eine Empfehlung von 50 km/h stellt die Anzeige der aktuell erlaubten Geschwindigkeit dar, die normalerweise auch ohne System gefahren wird. Daher lohnt ein Blick auf eine Analyse unter Ausschluss der 50 km/h-Anzeige. Demnach liegen die Positionen 1-3 mit 42-49 % nahe beieinander, während auf der vierten Position 70 % der Ampeln bei Grün durchfahren werden (siehe Abbildung 78 rechts).

Insbesondere nach Anzeigen von 35, 40 und 45 km/h erreichen Fahrer auf der vierten Position mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit eine grüne Ampel, während die erste Position bei diesen Anzeigen bezüglich ihrer Effizienz schlechter abschneidet (siehe Abbildung 79).

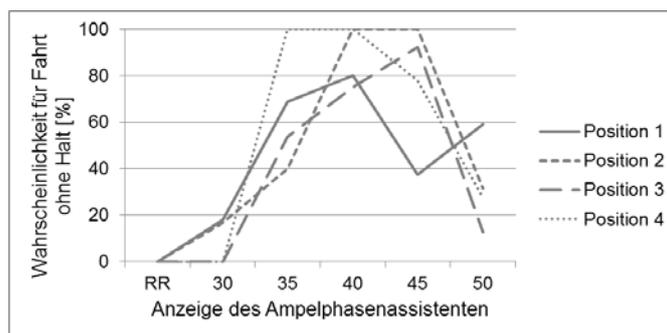


Abbildung 79: Wahrscheinlichkeit für eine Fahrt ohne Halt differenziert nach Positionen und Anzeige des Ampelphasenassistenten.

7.2.3.3 Einflüsse auf das Fahrverhalten

Der Ampelphasenassistent verhilft zu einem selteneren Anhalten an Ampeln. Demnach befolgen die Fahrer die Systemempfehlungen und passen ihr Fahrverhalten an die Anzeigen an. Im Folgenden werden diese Änderungen des Fahrverhaltens beschrieben.

So begehen die Fahrer mit System seltener Geschwindigkeitsübertretungen ($F(1, 54) = 3.70, p = .060, \eta^2 = .06$). Eine Geschwindigkeitsübertretung wird hierbei definiert als eine Geschwindigkeit größer 10 % der erlaubten Höchstgeschwindigkeit – in der vorliegenden Innenstadtstrecke somit 55 km/h. In geringen Ausstattungsraten (0 % und 25 %) ist dieser Anteil höher als in den anderen Raten ($F(4, 54) = 7.87, p < .001, \eta^2 = .37$; siehe Abbildung 80 links). Ab einer Ausstattungsrate von 50 % fahren beide Gruppen relativ geschwindigkeitsangepasst. Somit kommt es bei 50 % bzw. 75 % auch bei den Fahrern ohne System nur noch selten vor, dass zu schnell gefahren wird (siehe Abbildung 80 rechts).

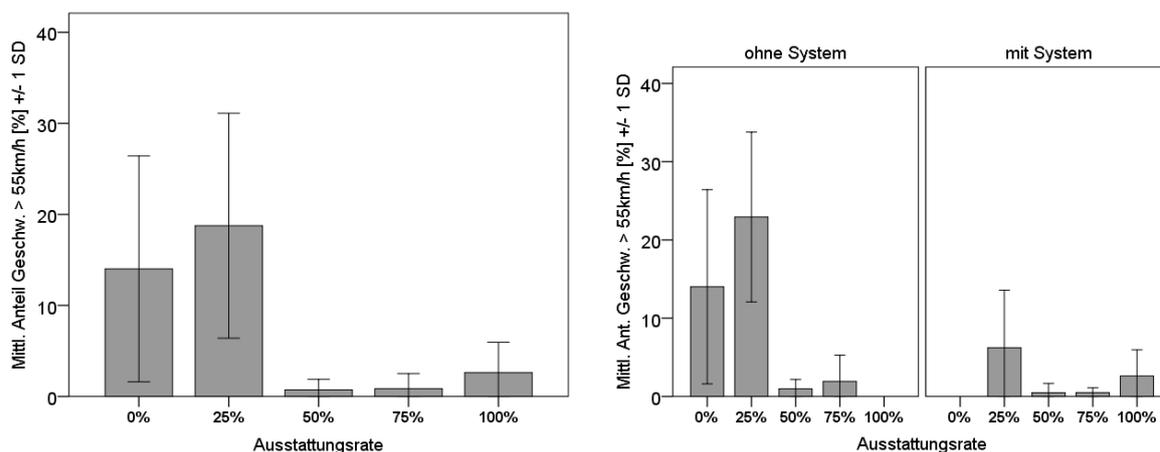


Abbildung 80: Anteile von zu schnellem Fahren (Geschwindigkeit > 55 km/h) für Ausstattungsraten (links) sowie für System und Ausstattungsrate (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Weiterhin halten die Fahrer mit System größere Abstände ($F(1, 54) = 28.91, p < .001, \eta^2 = .35$; siehe Abbildung 81 rechts). In der Kontrollgruppe halten wiederum die Fahrer in den gemischten Ausstattungsraten (25 %, 50 %, 75 %) kleinere Abstände als in der Bedingung mit 0 %-Ausstattungsrate. Einen Haupteffekt der Ausstattungsrate auf die mittleren Abstände gibt es dagegen nicht ($F(4, 54) = 0.97, p = .983, \eta^2 = .01$; siehe Abbildung 81 links).

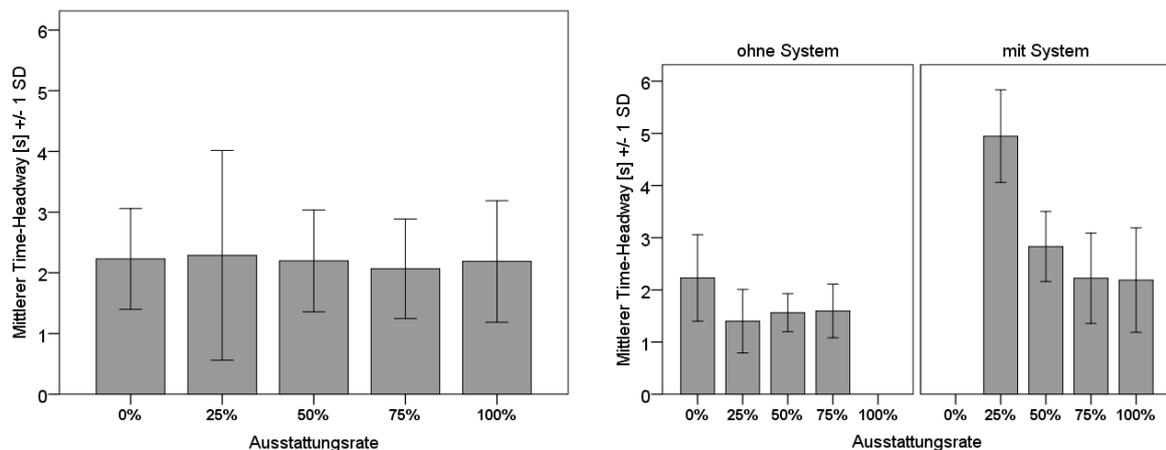


Abbildung 81: Time-Headway für Ausstattungsraten (links) sowie für System und Ausstattungsrate (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Mit System sind die Abstände der Fahrer variabler als bei den Fahrern ohne System ($F(1, 54) = 33.44, p < .001, \eta^2 = .38$). Vor allem die Fahrer der Experimentalgruppe in den gemischten Ausstattungsraten (25 %, 50 %, 75 %) halten unterschiedlich große Abstände. Innerhalb der Kontrollgruppe sind die Abstände dagegen relativ konstant (siehe Abbildung 82 rechts). Dies hat auch Auswirkungen auf den gesamten Fahrerpulk: In der 50 %-Ausstattungsrate ist die Variation des Abstands am größten, in der 0 %-Ausstattung am geringsten ($F(4, 54) = 3.19, p = .020, \eta^2 = .19$; siehe Abbildung 82 links).

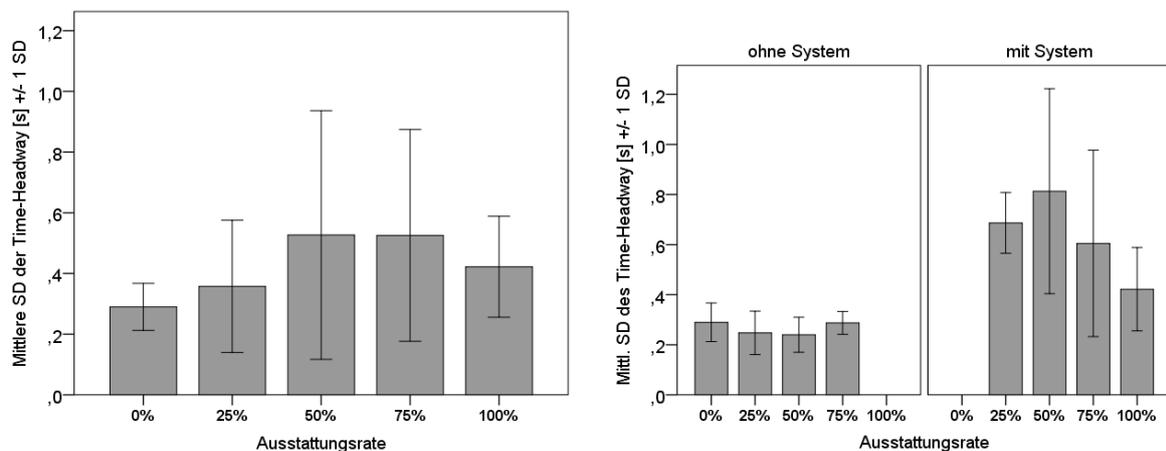


Abbildung 82: Standardabweichung des Time-Headway für Ausstattungsraten (links) sowie für System und Ausstattungsrate (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Dieses Resultat spiegelt sich auch in den Pulkparametern wider. Hierzu werden die Standardabweichungen der Maße THW_{Pulk} und Pulklänge herangezogen. Bei THW_{Pulk} zeigt sich wie bei den Einzelparametern ein Maximum bei 50 % und die geringsten Werte bei 0 % und 100 % (siehe Abbildung 83 links). Dies bedeutet, dass der zeitliche Abstand zwischen den äußersten Fahrern des Pulks in gemischten Ausstattungsraten variabler ist. Auf den streckenbezogenen Abstand hat dies jedoch keine Auswirkung, da die Pulkängen aller Ausstattungsarten vergleichbar sind (siehe Abbildung 83 rechts). Eine inferenzstatistische Absicherung ist aufgrund der geringen Zellenbesetzung von $n = 3$ jedoch nicht möglich.

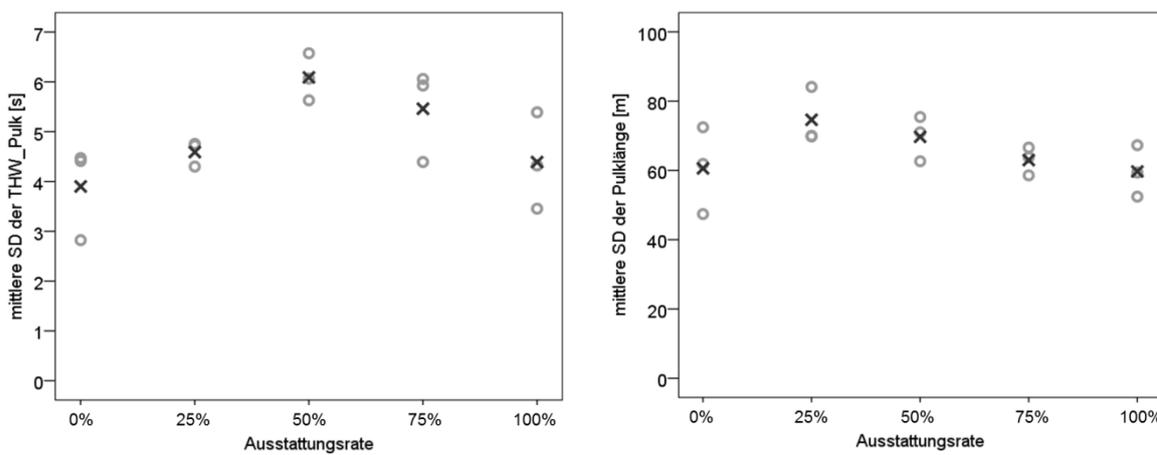


Abbildung 83: Mittlere Standardabweichung des THW_{Pulk} (links) und der Pulklänge (rechts) für die fünf Ausstattungsrate. Die Werte der einzelnen Pulks sind als Kreise, die Mittelwerte der Ausstattungsrate sind als Kreuze dargestellt.

7.2.3.4 Einflüsse auf den Ärger

Eine Befürchtung bei der Einführung des Ampelphasenassistenten besteht darin, dass nicht-assistierte Fahrer sich durch Fahrer, welche die Systemempfehlungen befolgen, behindert fühlen könnten. Dies könnte in Ärger resultieren und wird in diesem Teilkapitel dargestellt.

In der Fahrtbefragung zeigt sich zur Frage des Ärgers kein Unterschied zwischen Experimental- und Kontrollgruppe ($F(1, 54) = 2.68, p = .108, \eta^2 = .05$; siehe Abbildung 84 rechts). Betrachtet man dagegen die Ausstattungsrate, ärgern sich die Fahrer der 50%-Ausstattungsrate am stärksten und diejenigen in der 0%-Ausstattungsrate am geringsten ($F(4, 54) = 2.73, p = .039, \eta^2 = .17$; siehe Abbildung 84 links).

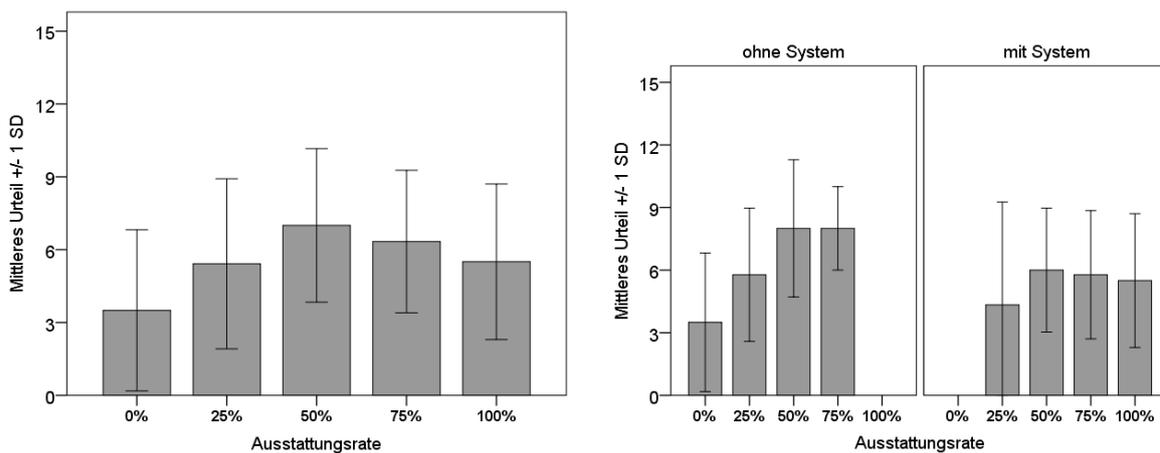


Abbildung 84: Urteil bezüglich der Frage „Wie oft haben Sie sich über andere Fahrer geärgert?“ für Ausstattungsrate (links) sowie für System und Ausstattungsrate (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Eine konkrete Schilderung der Situationen, in denen sich Fahrer über andere Fahrer geärgert haben, erfolgte in der offenen Situationsbewertung. Hier wurde Ärger im Wesentlichen aufgrund zweier Ursachen benannt:

- Ärger über langsames Fahren des Vorderfahrzeugs (ohne System: $n = 18$ bzw. 60 %; mit System: $n = 16$ bzw. 53 %; siehe Abbildung 85 rechts oben; z. B. „Andere Fahrer schleichen auf gerader Strecke und fahren langsam bei grüner Ampel“).
- Ärger über plötzliche Bremsungen des Vorderfahrzeugs (ohne System: $n = 8$ bzw. 27 %; mit System: $n = 6$ bzw. 20 %; siehe Abbildung 85 rechts unten; z. B. „unerklärliches Bremsen des Vorderfahrzeugs“).

Auch in dieser offenen Befragung bestätigt sich der oben dargestellte Befund. Die Probanden ärgern sich am wenigsten über ihre Mitfahrer (aufgrund langsamen Fahrens oder plötzlichen Bremsens), wenn alle ohne System fahren bzw. geben den stärksten Ärger bei einer Ausstattungsrate von 50 % an (siehe Abbildung 85 links).

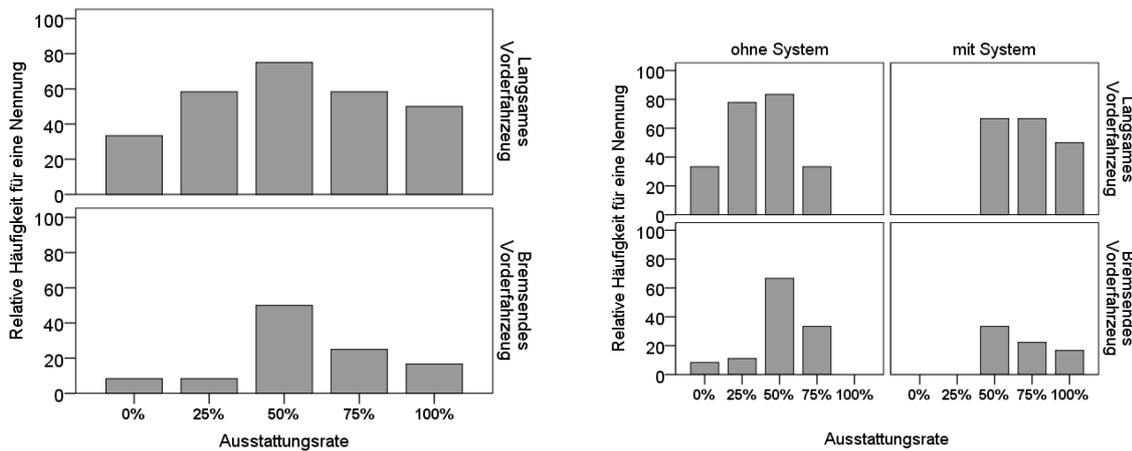


Abbildung 85: Relative Häufigkeiten der Nennung der Kategorie „Langsames Vorderfahrzeug“ (oben) bzw. „Bremsendes Vorderfahrzeug“ (unten) für Ausstattungsrate (links) sowie für System und Ausstattungsrate (rechts).

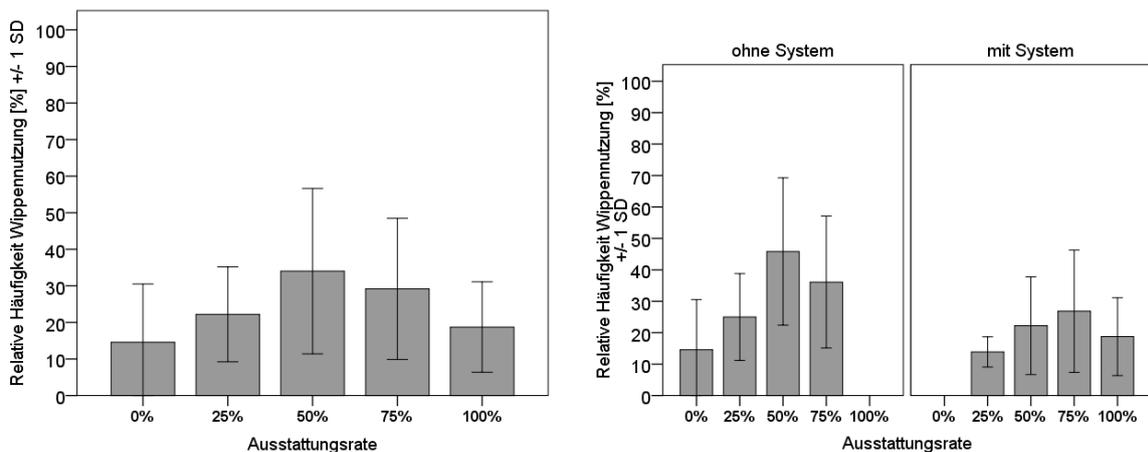


Abbildung 86: Relative Häufigkeit für die Wippennutzung für Ausstattungsrate (links) sowie für System und Ausstattungsrate (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Diese durch Urteile erfassten Ergebnisse spiegeln sich auch in der Wippennutzung wider. Die Wippe wird in der Kontrollgruppe häufiger verwendet als in der Experimentalgruppe ($F(1, 54) = 6.89, p = .011, \eta^2 = .11$; siehe Abbildung 86 rechts). Vergleichbar zu den Befragungen fällt auch hier der durch das Wippenziehen geäußerte Ärger in der 50 %-Ausstattungsrate am stärksten und in der 0 %-Ausstattungsrate am geringsten aus ($F(4, 54) = 4.21, p = .005, \eta^2 = .24$; siehe Abbildung 86 links).

Wie die bisher berichteten Ergebnisse zeigen, kann die Einführung eines Ampelphasenassistenten zu einer Erhöhung des Ärgers bei allen beteiligten Fahrern führen. Dieses Problem tritt insbesondere dann auf, wenn die Fahrer durch den Umgebungsverkehr behindert werden und nur langsamer fahren können als gewünscht. Dies führt zu der Frage, welche von einem System empfohlene Geschwindigkeit vorausfahrender Fahrzeuge noch tolerierbar ist und ab wann Ärger ausgelöst wird.

Um dies zu untersuchen, wurden die einzelnen Ereignisse von Wippennutzungen detailliert betrachtet. Hierzu wurden Intervalle festgelegt, die 10 s vor der Wippennutzung begannen und 6 s nach dieser endeten. Es wurden nur Wippennutzungen im Auswertebereich 2 (300 m bis 100 m vor der Ampel) herangezogen, bei denen der Proband nicht an erster Position fuhr. Anschließend wurden die Geschwindigkeitsverläufe der Einzelereignisse betrachtet, um die Situation um die Wippennutzung genau zu beschreiben. Ein Beispiel für einen derartigen Geschwindigkeitsverlauf zeigt Abbildung 87.

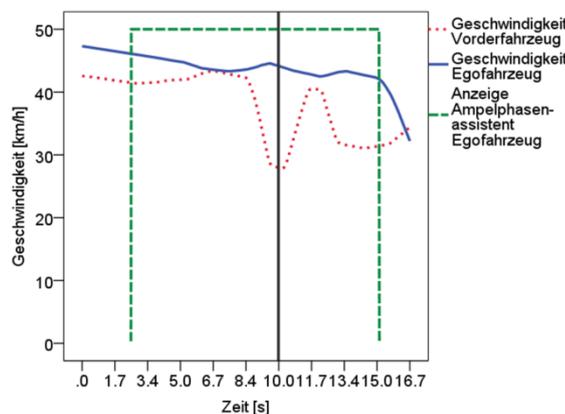


Abbildung 87: Geschwindigkeitsverlauf für ein Intervall um die Wippennutzung eines Fahrers der Experimentalgruppe: Zeitpunkt des Wippenziehens (senkrechte Linie), eigene Geschwindigkeit (durchgezogene Linie), Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs (gepunktete Linie) und Anzeige des Systems (gestrichelte Linie).

Auf Basis dessen wurden die Wippennutzungen kategorisiert. Tabelle 14 stellt die Häufigkeiten der verschiedenen Situationskategorien, welche durch die Einzelfallbetrachtung der Geschwindigkeitsverläufe definiert wurden, dar. Bei den Fahrern der Kontrollgruppe ereignet sich eine Wippennutzung meist dann, wenn das Vorderfahrzeug dauerhaft langsamer als 50 km/h fährt. In der Experimentalgruppe erfolgt die Wippenziehung am häufigsten, wenn die Geschwindigkeit des Ampelphasenassistenten nicht eingehalten werden kann.

Tabelle 14: Klassifizierung der Situationen mit Wippennutzung in Kontroll- und Experimentalgruppe. In den Klammern sind die jeweiligen Häufigkeiten dargestellt.

Ohne System	Mit System
Langsames Vorderfahrzeug (86)	Differenz zur Anzeige, aber weiterhin Grüne Welle (31)
Starke Bremsung des Vorderfahrzeugs (25)	Differenz zur Anzeige und Wechsel zur Restrot-anzeige (26)
	Starke Bremsung des Vorderfahrzeugs (8)
	Geschwindigkeit passend zur Anzeige, aber unter erlaubter Höchstgeschwindigkeit (7)

Als Maß zur Beantwortung der Frage, welche Geschwindigkeiten vorausfahrender Fahrzeuge tolerierbar sind, wurde die mittlere Geschwindigkeitsdifferenz gewählt. Hierzu wurde die Differenz der Anzeige bzw. Wunschgeschwindigkeit und der aktuellen Geschwindigkeit des Ego-Fahrers berechnet und pro Intervall kumuliert (siehe Abbildung 88). Daraus die durchschnittliche Differenzgeschwindigkeit v_{Diff} über das betrachtete Intervall berechnet. Für Bereiche, in denen die Soll-Geschwindigkeit permanent geringer war als die Ist-Geschwindigkeit, wurde keine Differenz berechnet, da die hieraus resultierende Differenzgeschwindigkeit null betragen würde.

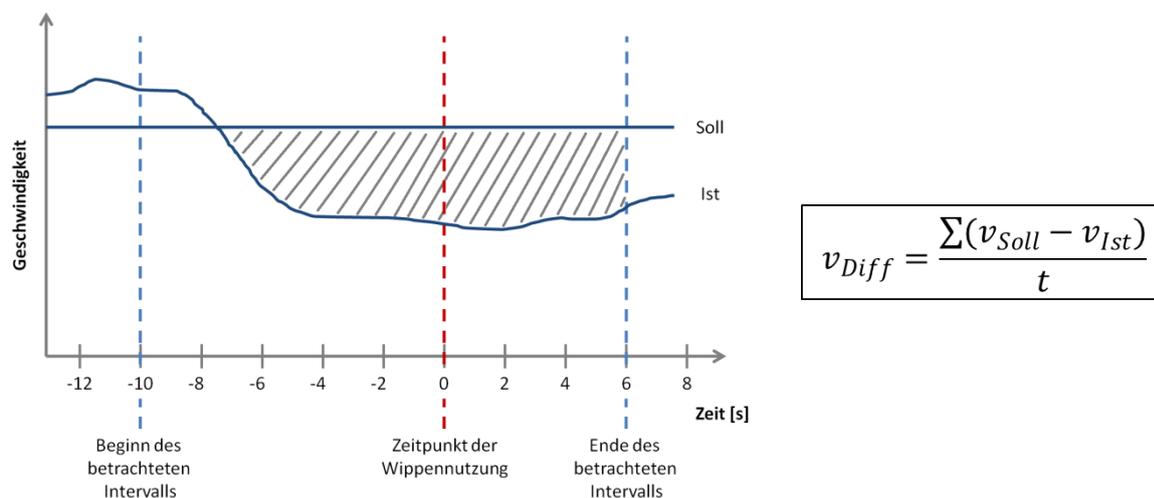


Abbildung 88: Schematische Darstellung der Ermittlung der mittleren Differenzgeschwindigkeit. „Soll“ entspricht der Anzeige des Systems bzw. der Wunschgeschwindigkeit. „Ist“ zeigt die aktuelle Geschwindigkeit. Der für die Auswertung verwendete Bereich ist schraffiert dargestellt (links). Formel zur Berechnung der mittleren Differenzgeschwindigkeit (rechts).

Dieses Maß wurde auch für die Kontrollgruppe während der Intervalle mit Wippennutzung verwendet. Hier liegt allerdings keine von einem System vorgegebene Soll-Geschwindigkeit vor. Stattdessen wurde die pro Fahrer individuelle Wunschgeschwindigkeit gewählt und der Parameter v_{Diff} nach demselben Muster wie oben beschrieben berechnet. Die Wunschge-

schwindigkeit wurde definiert als die Durchschnittsgeschwindigkeit während der Ampelanfahrt an Position 1, da hier der Proband unbeeinflusst von vorausfahrenden Fahrzeugen fahren kann. Um Artefakte aufgrund des Abbremsens an einer roten Ampel zu verhindern, wurde in dieser Berechnung der Wunschgeschwindigkeit ausschließlich der Auswertebereich 2 berücksichtigt ($M = 53.2 \text{ km/h}$; $SD = 4.5$; eine Auflistung der Wunschgeschwindigkeiten ist im Anhang in Tabelle 18 zu entnehmen).

Als Referenz für Abschnitte, in denen die Wippe nicht gezogen wurde und die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrers somit tolerierbar war, wurde der Parameter auch hier nach diesem Schema bestimmt. Als Berechnungsintervall diente der gesamte Auswertebereich 2, da in diesem kompletten Intervall die Wippe nicht genutzt wurde.

Eine Übersicht über die verwendeten Soll-Geschwindigkeiten und Berechnungsintervalle für die Bestimmung der Differenzgeschwindigkeit gibt Tabelle 15.

Tabelle 15: Verwendete Soll-Geschwindigkeiten und Berechnungsintervalle für die Bestimmung der mittleren Differenzgeschwindigkeit.

	Wippennutzung		Keine Wippennutzung	
	Mit System	Ohne System	Mit System	Ohne System
Soll-Geschwindigkeit	Anzeige der grünen Welle	Wunschgeschwindigkeit	Anzeige der grünen Welle	Wunschgeschwindigkeit
Intervall	10 s vor Nutzung bis 6 s danach		300 m bis 100 m vor der Ampel	

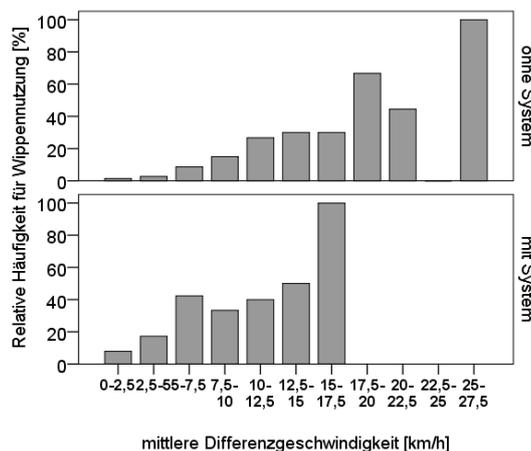


Abbildung 89: Relative Häufigkeiten für die Wippennutzung pro durchschnittliche Differenzgeschwindigkeit von der Anzeige (mit System) bzw. von der Wunschgeschwindigkeit (ohne System) in Abhängigkeit der Bedingung.

Abbildung 89 zeigt, mit welcher relativen Häufigkeit die Wippe von den Fahrern gezogen wird, wenn eine bestimmte durchschnittliche Differenzgeschwindigkeit von der Systemanzeige bzw. von der Wunschgeschwindigkeit vorliegt. Es sind zwei unterschiedliche Verläufe für die beiden Bedingungen zu sehen. In der Kontrollgruppe wird bis zu einer Abweichung von

17.5 km/h die Wippe in höchstens einem Drittel der Fälle genutzt. Im Bereich ab 25 km/h erfolgt immer ein Wippenziehen. Bei der Experimentalgruppe dagegen wird die Wippe schon bei kleinen Abweichungen häufiger gezogen. Ab einer Differenz von 5 km/h erfolgt das Wippenziehen in mindestens 35 % der Ereignisse. Bereits ab einer Abweichung von 15 km/h wird die Wippe dabei immer genutzt.

7.2.3.5 Einflüsse auf die Fahrsicherheit

Die vorangegangenen Kapitel zeigen, dass der Ampelphasenassistent einen Einfluss auf die Fahreffizienz und das Geschwindigkeitsverhalten hat. Dadurch wird allerdings Ärger, vor allem in den gemischten Ausstattungsrate, ausgelöst. Daher ist zu untersuchen, ob dieser Ärger über zu langsam fahrende Vorderfahrzeuge auch zu einer Erhöhung sicherheitskritischer Situationen führt, indem die Fahrer dichter auffahren. Hierbei wird nur der Auswertebereich 2 berücksichtigt, um Störeinflüsse durch Sicht auf die Ampel zu eliminieren.

Als Definition für eine sicherheitskritische Situation wird wie in Kapitel 7.1.3.3 in Anlehnung an van der Horst (1991) das Unterschreiten einer TTC von 4 s verwendet. Im Vorkommen derartiger Situationen unterscheiden sich Kontroll- und Experimentalgruppe nicht ($F(1, 54) = 1.84$, $p = .181$, $\eta^2 = .03$; siehe Abbildung 90 rechts). Allerdings gibt es einen Einfluss der Ausstattungsrate: In den gemischten Ausstattungsrate (25 %, 50 %, 75 %) zeigen sich häufiger geringe TTCs, während sie ohne System (0 %) bzw. mit Komplettausstattung (100 %) kaum auftreten ($F(4, 54) = 4.02$, $p = .006$, $\eta^2 = .23$; siehe Abbildung 90 links).

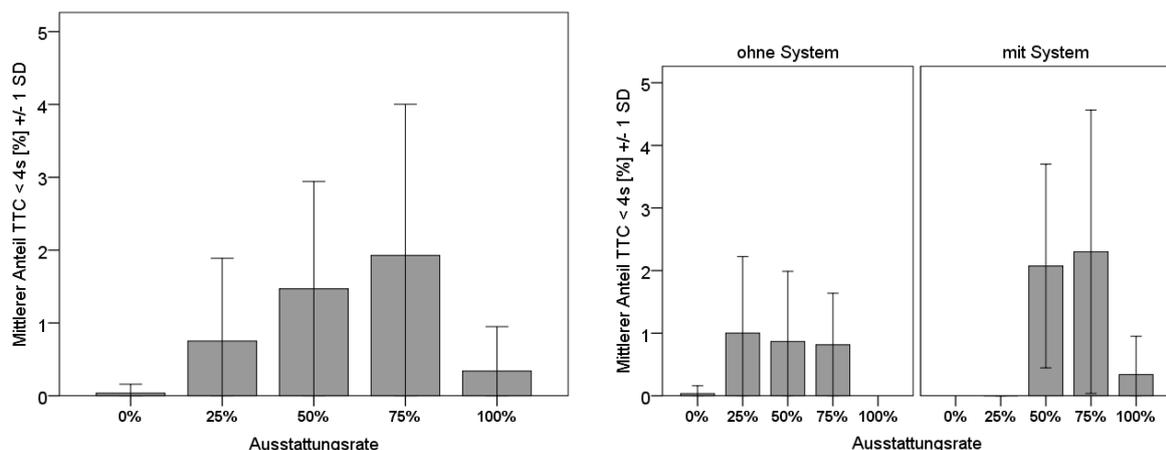


Abbildung 90: Anteile von TTCs kleiner als 4 s am Fahren in Auswertebereich 2 für Ausstattungsrate (links) sowie für System und Ausstattungsrate (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

7.2.4 Zusammenfassung und Diskussion

Ziel des Ampelphasenassistenten ist eine Verbesserung des gesamten Verkehrsflusses durch eine höhere Verkehrseffizienz. In der berichteten Studie konnte dieser gewünschte Effekt zum Teil nachgewiesen werden: Die Fahrer mit Unterstützung des Systems erreichten mehr Ampeln bei Grün als die Fahrer der Kontrollgruppe. Die Kontrollgruppe in gemischten Ausstattungsrate konnte dagegen von der Systemausstattung der anderen Fahrer nicht profitieren.

Insbesondere Fahrer auf der letzten Position hatten einen Nutzen vom System. Zwar können sie empfohlene Geschwindigkeiten von 50 km/h aufgrund der vorausfahrenden Fahrer seltener einhalten, befolgen aber in höherem Maße geringere Geschwindigkeitsempfehlungen (35 km/h, 40 km/h, 45 km/h) und erreichen hierdurch in diesen Situationen wahrscheinlicher grüne Ampeln.

Die Fahrer geben an, die Empfehlungen des Systems meist zu befolgen. Diese Systembefolgung führt dazu, dass seltener zu schnell gefahren wird und dies hat auch Auswirkungen auf die Kontrollgruppe: Ab einer Ausstattungsrate von 50 % werden diese aufgrund der Experimentalgruppe nahezu immer gezwungen, die erlaubte Geschwindigkeit einzuhalten.

Diese Einschränkung im Fahren bringt allerdings eine Verstärkung des Ärgers mit sich. Insbesondere in der 50 %-Ausstattungsrate ist der Ärger am stärksten, während er in der 0 %-Ausstattung am geringsten ist. Die Fahrer geben an, sich meist über langsam fahrende oder plötzlich abbremsende Vorderfahrzeuge zu ärgern. Daher wird die Wippe in der Kontrollgruppe meist in Situationen mit langsam fahrenden Vorderfahrzeugen genutzt. In der Experimentalgruppe wird die Wippe vor allem dann gezogen, wenn die empfohlene Geschwindigkeit aufgrund des vorausfahrenden Verkehrs nicht eingehalten werden kann. Im Vergleich beginnt die Experimentalgruppe früher als die Kontrollgruppe, die Wippe zu ziehen: Auch schon bei kleineren Differenzen zur empfohlenen Geschwindigkeit (ab 5 km/h) wird die Wippe in mindestens 35 % der Fälle genutzt. Die Kontrollgruppe beginnt dagegen erst bei Differenzen von 17.5 km/h zur Wunschgeschwindigkeit, die Wippe verstärkt zu ziehen. Dies spricht dafür, dass die minimale Anzeige der Grünen Welle etwas höher als die hier verwendeten 30 km/h sein sollte.

Das teilweise Vorhandensein des Ampelphasenassistenten in gemischten Ausstattungsraten führt weiterhin zu einer Heterogenisierung des Verkehrsflusses. Die zeitlichen Abstände zwischen den Fahrzeugen werden variabler und größer, während im Fall ohne System die Abstände eher klein und konstant sind.

Somit kann zusammengefasst werden, dass der Ampelphasenassistent prinzipiell seinen Zweck für den einzelnen assistierten Fahrer erfüllt. Für den nicht-assistierten Umgebungsverkehr dagegen ergeben sich keine Vorteile: Insbesondere in gemischten Ausstattungsraten zeigen sich sowohl bei Fahrern ohne als auch mit System negative Begleiterscheinungen wie verstärkt auftretender Ärger oder sehr geringe bzw. sicherheitskritische Abstände. Diese Probleme treten beim Fahren ohne System kaum auf. Erst bei einer Komplettausstattung von 100 % lassen diese negativen Begleiterscheinungen des Ampelphasenassistenten wieder nach.

Aus methodischer Sicht kann festgehalten werden, dass viele Effekte nur in der Pulksimulation gezeigt werden konnten. Insbesondere der Einfluss von Ausstattungsraten auf den Verkehrsfluss ist in einer Einzelfahrsimulation nicht möglich zu bestimmen. Zudem müsste in einer Einzelfahrsimulation das Befolgungsverhalten der umgebenden Fahrermodelle programmiert werden. Dieses hängt allerdings von der Positionierung und der empfohlenen Geschwindigkeit ab, wie diese Studie zeigen konnte (beispielsweise halten sich Fahrer auf letzter Position in höherem Maße als Fahrer an erster Position an geringe empfohlene Geschwin-

digkeiten). Diese Ergebnisse können somit in die Entwicklung neuer Fahrermodelle eingehen, um das Befolgungsverhalten dieser Modelle in Einzelfahrsimulation und Verkehrssimulation realistischer darzustellen.

Wenn dies geschehen ist und sich die Modelle der Einzelfahrsimulation weitgehend realitätsgetreu verhalten, ist jedoch immer noch fraglich, ob die vom Probanden gezeigten Reaktionen (wie z. B. Rücksichtnahme und Ärger) gegenüber künstlichen Agenten denen entsprechen, die er gegenüber realen Fahrern empfindet. Es ist anzunehmen, dass Probanden differenzieren, ob sie durch langsames Fahren ein simuliertes Fahrermodell oder einen realen Menschen behindern. Dies hätte wiederum Einfluss auf das Fahrverhalten der Probanden und spricht für die Pulksimulation als Methode zur Untersuchung derartiger verkehrspsychologischer Fragestellungen.

8 DISKUSSION: ANFORDERUNGEN AN DIE VERSUCHSSTADIEN

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Methode der Pulksimulation zur Untersuchung verkehrspsychologischer Fragestellungen weiterzuentwickeln, zu prüfen und zu etablieren. Für diesen Zweck wurden in Kapitel 3 spezifische Fragen zu methodischen Besonderheiten der Pulksimulation gestellt, die alle Stadien einer experimentalpsychologischen Untersuchung nach Reiß und Sarris (2012) betreffen. Um diese Fragestellungen zu untersuchen, wurden mehrere methodisch und inhaltlich geleitete Studien durchgeführt. Basierend auf den Erkenntnissen und Ergebnissen dieser Untersuchungen werden in diesem Kapitel die aufgeworfenen Fragen beantwortet.

8.1 Problembildung

8.1.1 Geeignete Fragestellungen für die Pulksimulation

Da die Pulksimulation ein Bindeglied zwischen Fahr- und Verkehrssimulation darstellt, sind durch sie viele klassische Fragestellungen dieser Versuchsumgebungen untersuchbar und sogar erweiterbar.

Die Pulksimulation als Erweiterung der Fahrsimulation

Einer der wichtigsten Vorteile der Fahrsimulation ist die Möglichkeit zur Untersuchung sicherheitskritischer Situationen. Dies ist auch in der Pulksimulation möglich. Somit können sicherheitskritische Studien mit mehreren Fahrern, deren Realisierung im Realverkehr oder im Testgelände problematisch ist, in einer sicheren virtuellen Umgebung ohne Gefahr von Probanden, Versuchsleitern sowie anderen Verkehrsteilnehmern durchgeführt werden.

Daneben sind Fragestellungen zur Untersuchung sozialer Einflüsse denkbar. Ein bisher viel untersuchter Faktor stellt hierbei Ärger und Aggression im Straßenverkehr dar. Diese werden nach Maag, Krüger, Breuer, Benmimoun, Neunzig und Ehmanns (2003) oftmals durch das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer ausgelöst: Insbesondere vorausfahrende langsamere Fahrer und nachfolgende dicht auffahrende Fahrer lösen diese negativen Emotionen aus. Der hierdurch entstandene Ärger kann wiederum zu eigenem Drängeln in einer folgenden Situation führen. Bei der Realisierung dieser Situationen in der Pulksimulation ist der Einsatz eines Vertrauten der Versuchsleitung (der als Proband in die Gruppe „eingeschleust“ wurde) mög-

lich. Dieser Vertraute könnte das gewünschte Verhalten (Drängeln oder Behindern) während der Fahrt umsetzen, worauf die Reaktionen der anderen Fahrer untersucht werden. Aufgrund der Hinweise, dass emotionale Reaktionen in virtuellen Welten gegenüber realen Agenten stärker ausgeprägt sind als gegenüber programmierten Modellen (siehe Kapitel 2.2.2), können diese Fragestellungen in der Pulksimulation realistischer und effektiver untersucht werden.

Aus demselben Grund ist auch kooperatives Fahrverhalten, wie dies z. B. beim Einfädeln oder Vorfahrt überlassen auftritt, in der Pulksimulation gut untersuchbar. Für diese Fragestellungen können auch neue Arten der Kommunikation eingesetzt werden, die im Zuge der Car-to-Car-Technologie möglich sind, wie z. B. das Versenden von Nachrichten zwischen den Fahrern:

- „Danke, dass Du mich hast einfädeln lassen!“
- „Bitte lass mich vor, ich habe einen Termin!“
- „Bitte halte Abstand, Du fährst dicht auf!“

Eine ähnliche Fragestellung, jedoch ausschließlich in der Einzelfahrsimulation, wird von A. Benmimoun, Neunzig und Maag (2004) berichtet. Dem Probanden wurden per Mikrofon Durchsagen in den Fahrzeuginnenraum eingespielt, welche eine Aufforderung oder Bitte eines anderen simulierten Fahrers darstellten (z. B. „Bitte weichen Sie aus, ich habe einen Termin und bin in Eile“, „Weg da, weg da! Ich will vorbei!“). Untersucht wurden die Reaktionen des Probanden auf einen derartigen Wunsch. In der Pulksimulation könnte darüber hinaus das Nutzungsverhalten einer derartigen Kommunikationsmöglichkeit und deren Akzeptanz auf Seiten des Senders und des Empfängers gleichzeitig geprüft werden.

Ein weiterer möglicher Untersuchungsbereich ist das Verhalten spezifischen Fahrern gegenüber. Da sich die Fahrer bei einem Versuch in der Pulksimulation aufgrund der Versuchssituation kennen und eventuell auch in der virtuellen Umgebung einander zuordnen können, ist eine Untersuchung sozialer Effekte möglich. Dies kann z. B. Hilfsbereitschaft gegenüber unsicheren oder älteren Verkehrsteilnehmern oder Fahranfängern sein, aber auch der Versuch des Beeindrucks anderer Probanden durch möglichst risikofreudiges Fahrverhalten.

Die Pulksimulation als Erweiterung der Verkehrssimulation

Wie in Kapitel 2.1.4 berichtet, wird in der Verkehrssimulation vor allem die verkehrliche Auswirkung von Manipulationen betrachtet. Für viele dieser Fragestellungen stellt die Pulksimulation eine Alternative als Untersuchungsinstrument dar.

Eine solche Manipulation kann z. B. die Einführung eines Fahrerassistenzsystems sein. So wurde in der Studie zum Ampelphasenassistenten (siehe Kapitel 7.2) zusätzlich die Systemausstattungsrate variiert, um verkehrliche Fragen zu beantworten: Ab welchem Grad der Ausstattung passen auch die nicht-assistierte Fahrer ihr Verhalten an? Wann entsteht der gewünschte Effekt auf den gesamten Verkehrsfluss?

Voraussetzung für die Auswahl eines Assistenzsystems für eine derartige Fragestellung ist, dass nicht-assistierte Fahrer überhaupt beeinflusst werden von den assistierten. Dies war beim Folgefahren mit Ampelphasenassistent der Fall: Da die assistierten Fahrer manchmal langsamere Geschwindigkeiten als die zulässige Höchstgeschwindigkeit fuhren, mussten auch die nachfolgenden nicht-assistierten Fahrer ihre Geschwindigkeit zwangsläufig verringern.

Neben Vorderfahrzeugen können Fahrer auch von Fahrzeugen auf der benachbarten Spur beeinflusst werden: So konnten Gouy, Diels, Reed, Stevens und Burnett (2012) zeigen, dass Fahrer kleinere Abstände halten, wenn auf der Nachbarspur ein elektronisch gekoppelter Konvoi mit sehr geringen Abständen fährt. Maag (2013) demonstrierte, dass Probanden auf bremsende simulierte Fahrzeuge auf der Nachbarfahrspur mit einem Verlassen des Gaspedals reagieren. Diese Studien implizieren, dass auch Abstandsregelsysteme wie Abstandsregeltempomat, Geschwindigkeitsregelsysteme wie Tempomat oder Gefahrenwarnungen zu Übertragungseffekten bei nicht-assistierten Fahrern führen können. Da derartige Effekte auf den umgebenden Verkehr in den meisten Fahrermodellen der Verkehrssimulation nicht vorhanden sind, sind Untersuchungen von Fahrerassistenzsystemen hinsichtlich der verkehrlichen Wirkung unterschiedlicher Ausstattungsraten nur in der Pulksimulation möglich.

Ein weiterer Schwerpunkt der Verkehrssimulation ist die Betrachtung von Verkehrszuständen. Insbesondere die Entstehung und Entwicklung von Staus ist hier ein wichtiges Thema. Häufig entstehen Staus aufgrund von Unfällen oder Baustellen mit Sperrungen einzelner oder aller Fahrspuren. Daneben existiert aber auch der „Stau aus dem Nichts“ (z. B. Nagel & Schreckenberg, 1992), bei dem der Stau aufgrund des Fahrverhaltens entsteht: Ein Fahrzeug wird zum leichten Abbremsen gezwungen, z. B. durch den Spurwechsel eines vorausfahrenden LKWs. Da die folgenden Fahrer sukzessive stärker bremsen, wird diese zunächst kleine Verzögerung immer stärker an nachfolgende Fahrzeuge weitergegeben (sog. Ziehharmonika-Effekt). Hierdurch entsteht eine Stauwelle, die in einem Stau mit Stillstand der Fahrzeuge münden kann. Auch in der Pulksimulation konnte dieses Phänomen beobachtet werden (siehe Kapitel 6.3.3). Daher könnten Stautentstehung und Ursachen für den „Stau aus dem Nichts“ in der Pulksimulation gut untersucht werden, da hier auch menschliche Faktoren wie Fahrerzustände (z. B. Ablenkung, Müdigkeit) betrachtet und manipuliert werden können.

Zusammenfassung

Einerseits ist die Pulksimulation für alle Fragestellungen der Fahrsimulation geeignet, in denen Interaktionen zwischen Fahrern (also Auswirkungen auf andere Fahrer und deren Rückkopplungen) eine Rolle spielen. Dies gilt insbesondere für Themen, die die Fahrsicherheit betreffen, da hier eine sichere Versuchsumgebung geboten ist.

Andererseits ist die Pulksimulation für alle Fragestellungen der Verkehrssimulation geeignet, für die der Faktor „Mensch“ mit realistischem Fahrverhalten wichtig ist. Für viele dieser Fragestellungen sind die derzeitigen Fahrermodelle noch nicht ausgereift und somit ungenügend (siehe z. B. Kapitel 6.3.4). Daher ist in diesen Fällen die Pulksimulation als neue Methode zu empfehlen.

Zusammengefasst stellt die Pulksimulation zum einen eine Fahrsimulation mit der Erweiterung um den Faktor „Verkehr“ dar, zum anderen aber auch eine Verkehrssimulation mit der Erweiterung um den Faktor „Mensch“. Durch die Betrachtung sozialer Interaktionen sind sowohl Aussagen zum Fahrerverhalten als auch zum Verkehrsverhalten möglich. Dieses Zusammenspiel ist in Abbildung 91 dargestellt.

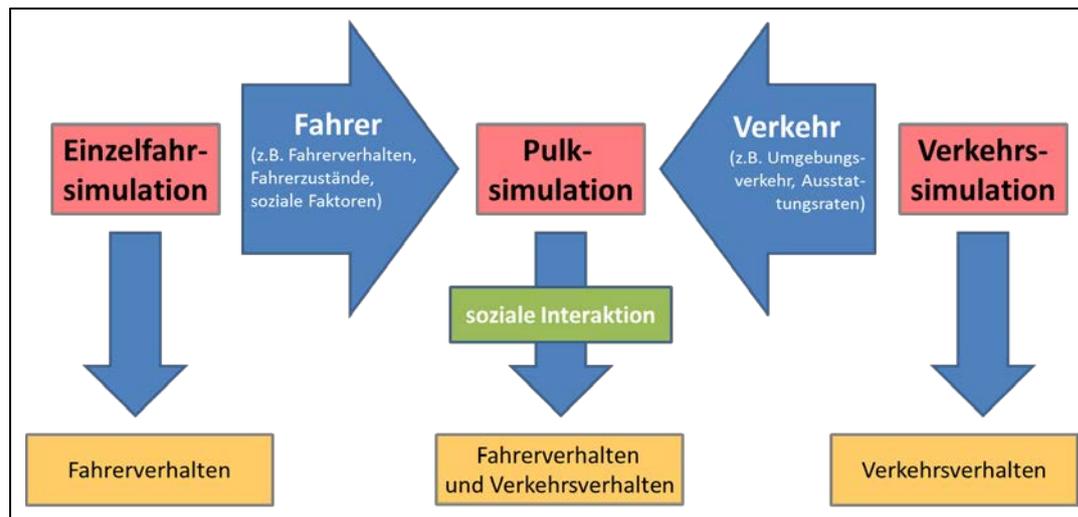


Abbildung 91: Die Pulksimulation als Brücke zwischen Fahr- und Verkehrssimulation.

8.1.2 Bestimmung des Mehrwerts der Pulksimulation

Der Mehrwert der Pulksimulation gegenüber der Einzelfahrsimulation liegt vor allem in (1) ökonomischen und (2) inhaltlichen Gründen.

Zum einen ist eine Studie in der Pulksimulation ökonomischer, da innerhalb einer Versuchssitzung mehrere Probanden erhoben werden können, während in derselben Zeit in der Einzelfahrsimulation nur ein Proband untersucht wird. Allerdings geht dieser Vorteil mit Kosten in Form einer geringeren Kontrollierbarkeit der Fahrsituationen einher.

Neben diesem eher pragmatischen Grund existieren vor allem inhaltliche Gründe. Diese wurden bereits im vorherigen Kapitel diskutiert und sind im Wesentlichen auf zwei Faktoren zurückzuführen: Zunächst existiert der Effekt des unterschiedlichen Fahrverhaltens zwischen Modellen und realen Fahrern. Wie schon beschrieben, haben die vorhandenen Modelle Defizite, um Fahrverhalten realitätsgetreu abbilden zu können. Aber auch bei einer optimalen und realistischen Programmierung der Modelle besteht immer noch das Wissen des Probanden, dass die anderen Fahrzeuge programmiert wurden und nicht von Menschen gesteuert werden. Beide Faktoren „Fahrverhalten“ und „Glaube an realistische Fahrer“ beeinflussen das Erleben und Verhalten des Fahrers.

Möchte man das Ausmaß dieser beiden Effekte bestimmen, so empfiehlt sich eine Vergleichsstudie mit Fahrten in Einzelfahr- und Pulksimulation. In den Fahrten sollten dieselben Fahraufgaben gefahren werden. Während die Fahrsituationen in der Pulksimulation ausschließlich

durch reale Fahrer erzeugt werden, werden in der Einzelfahrsimulation neben dem Probanden Fahrermodelle eingesetzt, die sich möglichst realitätsnah verhalten. Im anschließenden Vergleich von Fahrverhalten und subjektiven Urteilen kann man bestimmen, wie stark die Unterschiede zwischen den beiden Fahrten ausgeprägt sind. Diese Unterschiede bezeichnen die Summe der beiden oben genannten Effekte: Zum einen divergiert das Fahrverhalten von Modell und realem Fahrer, zum anderen weiß der Proband, dass die anderen Fahrer Modelle und nicht humangesteuert sind.

Daher ist noch eine dritte Fahrt notwendig, um die Größe der einzelnen Effekte bestimmen zu können. In dieser fährt der Proband dieselben Fahrsituationen in der Einzelfahrsimulation, allerdings wird er in den Glauben gebracht, reale Probanden würden die anderen Fahrzeuge in der Simulationsumgebung steuern. Dies könnte z. B. durch eine Fahrt in der X4-Simulation suggeriert werden, bei der mehrere Fahrer parallel die gleiche Strecke fahren, aber jeweils in einer eigenen virtuellen Umgebung (siehe Kapitel 4.1).

Durch den Vergleich dieser drei Fahrten können die beiden Effekte „Fahrverhalten“ und „Glaube an realistische Fahrer“ bestimmt werden (Abbildung 92). Möglicherweise unterscheiden sich die drei Untersuchungsansätze nach Fragestellungen: Es ist denkbar, dass für manche Fragestellungen der Faktor „Fahrerverhalten“ eher relevant ist und für andere der Faktor „Glaube an realistische Fahrer“. Nach einer derartigen Prüfung wie hier vorgeschlagen kann anschließend die geeignetste Untersuchungsstrategie identifiziert und verwendet werden. Ist beispielsweise der Glaube an realistische Fahrer entscheidend und das Fahrverhalten des Umgebungsverkehrs spielt keine Rolle für die Ergebnisse, kann die Studie auch in der Einzelfahrsimulation mit Täuschung des Probanden über den Umgebungsverkehr durchgeführt werden.

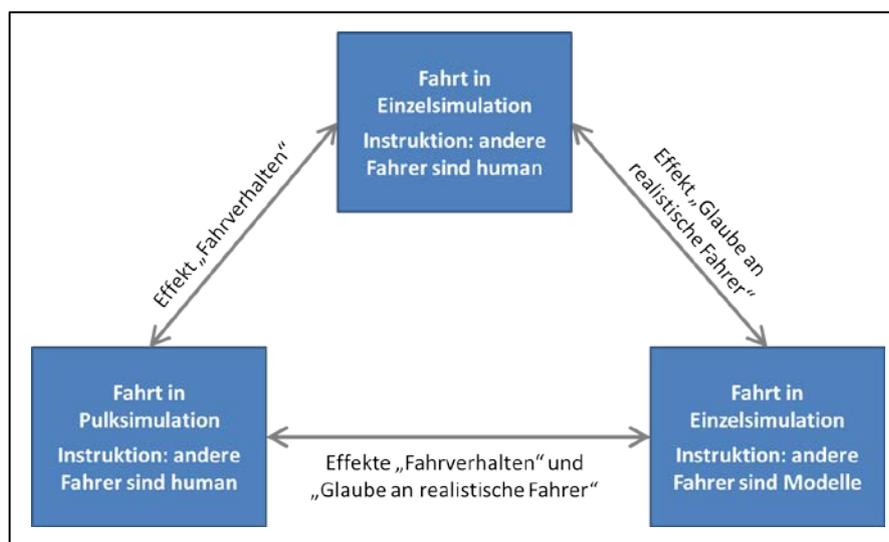


Abbildung 92: Ansatz zur Bestimmung des Mehrwerts der Pulksimulation gegenüber der Einzelfahrsimulation.

8.2 Versuchsplanung

Die Pulksimulation ist vor allem dann geeignet, wenn sich die Fahrer in ihrem Fahrverhalten gegenseitig beeinflussen bzw. aufeinander reagieren, also eine soziale Interaktion erzeugen. Hierzu müssen sich die Probanden in der Simulation begegnen bzw. dürfen nicht allzu weit voneinander entfernt fahren. Mögliche Szenarien, in denen Interaktionen zwischen zwei oder mehr Fahrern auftreten können, sind:

- Kreuzen und Queren
- Folgefahren und Überholen
- Gegenverkehr
- Einfädeln

Um die Fahrer in diesen Szenarien wie gewünscht aufeinandertreffen zu lassen und somit Interaktionen zu provozieren, stehen die drei Möglichkeiten (1) Streckenbau, (2) Umgebungsverkehr sowie (3) Instruktion zur Verfügung:

8.2.1 Interaktionen durch den Streckenbau

Streckenbau eignet sich, um die Fahrer an definierten Streckenpunkten zum selben Zeitpunkt in Querverkehrs-, Gegenverkehrs- oder Einfädelszenarien aufeinandertreffen zu lassen. Diese Punkte können z. B. Kreuzungen, Kreisverkehre, Engstellen oder Autobahnauffahrten sein. Die Fahrer müssen gleichzeitig starten und über gleich lange Anfahrten mit denselben Geschwindigkeitsvorgaben zum gewünschten Streckenpunkt hingeleitet werden (siehe z. B. Abbildung 93 links). Der Start kann hierbei entweder durch eine Instruktion über Headset („Jetzt bitte losfahren“) oder über Ampeln erfolgen, die gleichzeitig auf Grün springen. Soll die Begegnung für die Fahrer unerwartet sein, kann dies über eine Verdeckung (z. B. durch Bebauung oder Bepflanzung) oder durch eine Kuppe begünstigt werden.

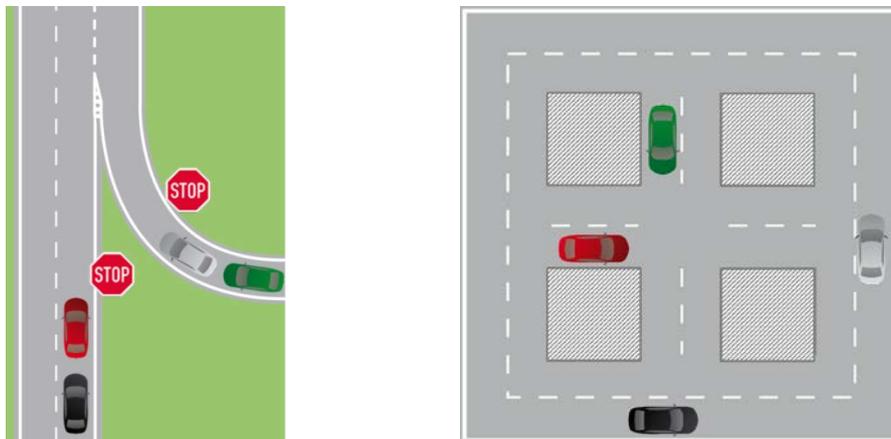


Abbildung 93: Schematischer Streckenvorschlag für Einfädelszenario: Die Fahrer starten gleichzeitig und erreichen die Auffahrt zum selben Zeitpunkt (links). Schematischer Streckenvorschlag für freies Fahren zur Untersuchung von Interaktionen im Kreuzungsbereich (rechts).

Falls sich die Fahrer nach der Begegnung wieder zusammenfinden sollen, um z. B. gemeinsam zur nächsten Prüfsituation geleitet zu werden, ist dies ebenfalls über Strecken zur Zusammenführung möglich. Dies wurde beispielsweise in der Untersuchung zum Ampelphasenassistenten eingesetzt (siehe Kapitel 7.2.2.3). Alternativ ist möglich, dass die Fahrt nach der Begegnung beendet und eine neue begonnen wird, in der die Fahrer direkt an den gewünschten Streckenpunkten starten können. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass jedes Beenden und Neustarten eines Versuchs den Fahrer in die Realität zurückbefördert und dadurch das Presence-Erleben des Probanden abgeschwächt wird.

Eine weitere Möglichkeit, Begegnungen zwischen Fahrern zu beobachten, ist die Gestaltung eines kleinen definierten Areals mit mehreren Kreuzungen (siehe Abbildung 93 rechts). Die Fahrtrichtung kann durch eine Navigationsanzeige bestimmt werden. Alternativ können die Fahrer dazu instruiert werden, sich in diesem Bereich frei zu bewegen. Zur Motivation, dieses Areal zu nutzen, könnten Aufgaben an die Fahrer gestellt werden (z. B. „Sie sind Taxifahrer und möchten viele Fahrgäste aufsammeln. Fahren Sie an möglichst vielen Passanten vorbei, die an der Straße stehen. Suchen Sie das gesamte Areal nach Fahrgästen ab, die immer wieder am Straßenrand auftauchen. Halten Sie sich dabei aber stets an die Straßenverkehrsordnung!“). Mit dieser Anordnung könnten zufällige Begegnungen der Fahrer und die somit entstehenden Interaktionen beobachtet werden.

8.2.2 Interaktionen durch den Umgebungsverkehr

Neben der Streckengestaltung ist der Einsatz von Umgebungsverkehr eine weitere Möglichkeit, das Aufeinandertreffen und insbesondere das Zusammenbleiben der realen Fahrer in der Simulation zu gewährleisten. Gerade bei Autobahnscenarien besteht die Gefahr, dass sich die realen Fahrer aufgrund von unterschiedlichen Geschwindigkeiten in der freien Fahrt verlieren und sich somit keine Interaktionen ereignen. Durch langsame simulierte Fahrzeuge auf den Fahrspuren (im Sinne von stockendem Verkehr) können somit schnellere Fahrer „eingefangen“ und der Pulk aus den Probanden wieder hergestellt werden. Nachdem sich der Pulk wieder gefunden hat, kann der simulierte Umgebungsverkehr durch Autobahnabfahrten von der Strecke abgeleitet werden.

Falls in einem Szenario der simulierte Umgebungsverkehr adaptiv auf die realen Fahrer reagieren muss und die Programmierung eines derartigen Verhaltens nicht möglich ist, kann dies durch die Steuerung des Umgebungsverkehrs durch reale Fahrer in der Pulksimulation erreicht werden. Ein Anwendungsfall wäre hier z. B. das Folgefahren auf einer Landstraße: Ein Vertrauter der Versuchsleitung fährt einem Pulk aus Probanden voraus. Überholen wird durch dichten Gegenverkehr oder ein Überholverbot verhindert. Es gilt eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Der Vertraute fährt jedoch eine langsamere Geschwindigkeit, sodass der Pulk zusammenbleibt. Falls die Abstände zwischen einzelnen Fahrern des Pulks zu groß werden, kann dies durch noch langsames Fahren reguliert werden.

8.2.3 Interaktionen durch die Instruktion

Falls der Pulk ohne Zuhilfenahme eines simulierten Vorderfahrzeugs zusammenbleiben soll, kann dies durch eine Instruktion erreicht werden. Diese könnte einen einzuhaltenden Abstand vorschreiben, wie z. B. halber Tacho oder geringstmöglichen Abstand (siehe Kapitel 6.3.6). Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass durch die Einführung dieser Instruktion die Fahraufgabe verändert wird. Es ist mit dem Ziehharmonika-Effekt zu rechnen, durch den für weiter hinter in der Kolonne fahrende Fahrer stärkere Beschleunigungen und Verzögerungen notwendig werden (siehe Kapitel 6.3.3), da der Abstand zu den weiter vorne fahrenden Fahrern aufrecht erhalten werden muss. Hierdurch werden auch die maximalen Geschwindigkeiten erhöht. Ein Vergleich der Simulatordaten von instruiertem Folgefahren mit Realfahrdaten von freiem Folgefahren zeigt Unterschiede bezüglich des Grades der Abhängigkeit zwischen den Fahrzeugen (siehe Kapitel 6.3.6). Während bei nicht instruiertem Fahren die Abhängigkeit zwischen zwei Fahrzeugen mit zunehmendem Abstand abnimmt, bleibt die Abhängigkeit mit Abstandsinstruktion auch bei größeren Abständen relativ konstant. Dies bedeutet, dass die Abstandsinstruktion die Fahraufgabe verändert.

8.3 Versuchsaufbau

8.3.1 Räumlichkeiten

Fahrstationen und Operatorenplatz sind in der Pulksimulation des WIVW in zwei getrennten Räumen untergebracht, dem Simulatorraum und dem Operatorraum. Dies hat den Vorteil, dass die Probanden während der Fahrt nicht von den Aktivitäten der Versuchsleiter abgelenkt werden können. Zudem ist es möglich, dass der Versuchsleiter durch eine zusätzliche Fahrstation im Operatorraum in das Geschehen in der simulierten Szenerie eingreifen kann, ohne dass dies für die Probanden offensichtlich ist.

Im Simulatorraum waren die Fahrstationen nicht voneinander abgeschirmt. Laut Aussage der Fahrer war dies auch nicht unbedingt notwendig: Nur 16 % der Fahrer haben angegeben, durch die Anwesenheit der anderen Probanden kurzzeitig ein wenig abgelenkt gewesen zu sein. Meist beruhte diese Ablenkung darin, dass man Geräusche der anderen Fahrer (z. B. Fragen an Versuchsleitung, heftiges Treten der Pedale) hörte. Diese Störeinflüsse können durch besser abgeschirmte Headsets ausgeschaltet werden.

Neben Simulatorraum und Operatorraum ist in einer Pulksimulation ein ausreichend großer Tisch mit Sitzgelegenheiten für alle Fahrer und Versuchsleiter notwendig. Hier können Wartezeiten überbrückt, Fragebögen ausgefüllt und Instruktionen für die gesamte Gruppe gegeben werden.

8.3.2 Aufbau einer Fahrstation und Simulationsumgebung

Generell sollte man sich beim Aufbau der Fahrstationen an ergonomische Empfehlungen orientieren, um eine Konfundierung der Ergebnisse mit dem Aufbau der Fahrstationen zu vermeiden.

Für die weitere Gestaltung des Simulationsaufbaus (z. B. 3D-Sicht oder Bewegungssystem) ist die zu untersuchende Fragestellung entscheidend. Dies soll am Beispiel des Blickfelds gezeigt werden: Für einfache Fahraufgaben wie Folgefahren ist schon eine Szenerie mit einem Blickfeld von 60° ausreichend. Für Szenarien wie Kreuzen oder Spurwechsel mit Schulterblick, die gerade für die Pulksimulation interessant sind, sind jedoch größere Blickfelder notwendig. Dies zeigt die hier berichtete Studie zu Kreuzungen (siehe Kapitel 6.3.8): Die Hälfte der insgesamt $N = 24$ Probanden wünscht sich ein größeres Blickfeld, um in die kreuzenden Einmündungen besser einsehen und den von dort kommenden Verkehr früher erkennen zu können.

Zudem wurde in dieser Untersuchung insbesondere bei unklaren Vorfahrtsregelungen deutlich, dass eine Darstellung der anderen Fahrer in den Fahrzeugen hilfreich wäre, um kommunikative Gesten wie Winken erkennen zu können. Befragungen von Fahrern haben gezeigt, dass vor allem in der Innenstadt freundschaftliche Gesten zum Einfädeln oder Abbiegen lassen häufiger erlebt werden (A. Benmimoun et al., 2004) und einen hohen Stellenwert bei Fahrern genießen (Ellinghaus, 1986). Für Studien zum Thema Ärger oder Aggression wäre eine Abbildung von Gesten in der Fahrsimulation ebenfalls eine sinnvolle Erweiterung, da Gesten auch in diesem Zusammenhang oft als Zeichen an andere Fahrer verwendet werden (Ellinghaus, 1986). Eine Umsetzung mit Hilfe von Kamerabildern und deren Einblendung in die simulierten Fahrzeuge der virtuellen Szenerie sollte daher geprüft werden. Falls dies technisch nicht umsetzbar ist, könnte Kommunikation durch eingeblendete Signale in der Szenerie vermittelt werden (siehe Beispiele in Abbildung 94), die vom jeweiligen Fahrer z. B. durch Tastendrucke am Lenkrad an seine Umwelt gesetzt werden können.

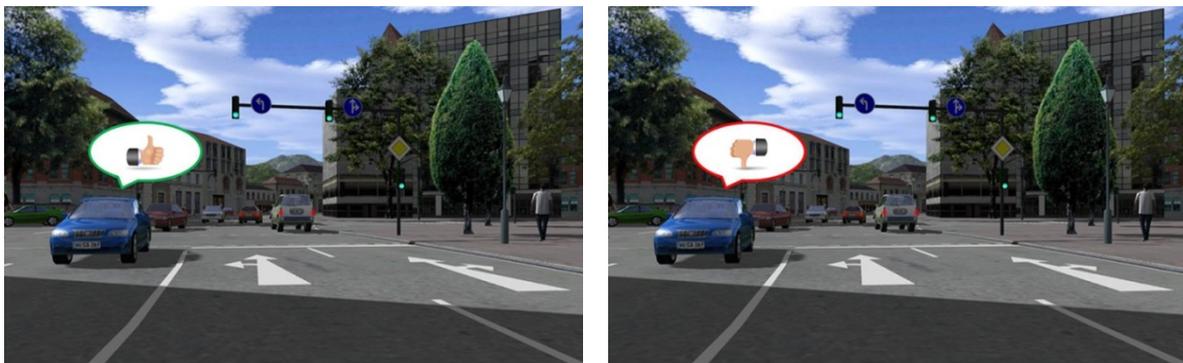


Abbildung 94: Beispiele für die mögliche Darstellung eines positiven (links) bzw. negativen (rechts) Signals eines Fahrers an den Umgebungsverkehr.

8.3.3 Anzahl an Fahrstationen

In den berichteten Studien wurden jeweils vier Fahrstationen verwendet. Es stellt sich die Frage, ob eine Erweiterung der Pulksimulation auf mehrere Fahrstationen sinnvoll wäre.

Durch eine Erweiterung wird der Durchdringungsgrad von realen Fahrern am gesamten Verkehr in der Simulation höher. Dadurch wird das Verkehrsgeschehen noch genauer und realistischer abgebildet. Der Einsatz vieler realer Fahrer empfiehlt sich insbesondere für Szenarien, in denen ein hohes Verkehrsaufkommen benötigt wird (wie z. B. die Entstehung von Stau oder die Annäherung an eine Stauende). Ebenso sind Fragestellungen nach Ausstattungsdaten von Systemen noch genauer untersuchbar, da eine höhere Anzahl an Variationen realisiert werden kann, während im Moment lediglich die Variationen 0 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 % möglich sind (siehe Kapitel 7.2).

Weiterhin wäre in Anordnungen mit Kreuzungsszenarien (siehe Kapitel 6.3.8) ein Aufeinandertreffen zweier Fahrzeuge wahrscheinlicher. Auch Untersuchungen in einem kleinen definierten Streckenbereich (wie in Abbildung 93 rechts dargestellt) sind umso sinnvoller, je mehr reale Fahrer in diesem Streckenstück eingesetzt werden, da mit der Fahreranzahl die Wahrscheinlichkeit für Interaktionen ansteigt. In Studien mit Positionseffekten (z. B. Studie zum Gefahrenwarner, siehe Kapitel 7.1) könnten Effekte über die vier Fahrzeuge hinaus, also noch für weiter entfernt fahrende Fahrzeug in der Kolonne, untersucht werden.

Demgegenüber ist zu beachten, dass eine Erweiterung der Pulksimulation mit einer Vergrößerung der logistischen Anforderungen einhergeht. Die Versuchsterminierung wird mit zunehmender Fahreranzahl komplizierter. Ebenso ist es wahrscheinlicher, dass einer der Fahrer verspätet bzw. gar nicht zum Versuchstermin erscheint oder eine Fahrt abbrechen muss, z. B. aufgrund von Simulatorübelkeit. Weiterhin wird eine Anpassung der Räumlichkeiten notwendig: Neben einem größeren Versuchsraum (wegen der erhöhten Anzahl an Fahrstationen) wird auch ein entsprechend großer Aufenthaltsbereich für die Fahrer erforderlich, in dem die Fahrer Wartezeiten überbrücken oder Befragungen durchführen können.

Aufgrund der erhöhten Wahrscheinlichkeit für den Ausfall mindestens eines Fahrers ist zu empfehlen, dass für Termine mit mehreren Probanden „Ersatzfahrer“ bereitgehalten werden, die kurzfristig einspringen können. Alternativ könnte man für einen Versuchstermin mehr als die notwendige Fahreranzahl einladen. Um dann trotzdem jeden erschienenen Fahrer einsetzen zu können, müssten neue Konzepte der Versuchsorganisation entworfen werden. Denkbar wäre hier eine Fahrerrotation bei n Fahrstationen: n Probanden fahren, während die übrigen Fahrer Pause haben. Die Besetzung in den Fahrten wird nach jeder Fahrt gewechselt.

Die Erhöhung der Probandenanzahl pro Termin geht auch mit einer Steigerung der Anforderung an die Versuchsleitung einher. Mehr Fahrer müssen betreut, instruiert, gesteuert und überwacht werden. Es ist zu prüfen, ob die hier verwendeten Hilfsmittel wie Vogelperspektive oder grafische SILAB-Benutzeroberfläche (siehe Kapitel 4.3) auch für Versuche mit mehr als vier Fahrern anwendbar sind. Weiterhin muss untersucht werden, wie das optimale Verhältnis aus Probanden und Versuchsleitern mit einer steigenden Anzahl an Fahrern ausfällt.

Analog zur höheren Ausfallwahrscheinlichkeit für Fahrer steigt mit einer Erweiterung der Pulksimulation die Wahrscheinlichkeit für Störungen in der Technik. In der hier verwendeten Pulksimulation bestand jede Fahrstation aus vier PCs, drei Bildschirmen, einem Display sowie Pedalerie, Lenkrad und der notwendigen Verkabelung. Wenn eines der beteiligten Geräte ausfällt, muss der Versuch unterbrochen, die Ursache gefunden und das Problem behoben werden. Um möglichst zügig fortfahren zu können, sollten ausreichend Ersatzgeräte bereitgehalten werden.

Neben diesen eher logistischen Problemen geht eine Erweiterung der Pulksimulation auch mit einer zunehmenden Verringerung der Kontrollierbarkeit einher. Je mehr reale Fahrer beteiligt sind, desto variabler werden die entsprechenden Fahrsituationen. Demgegenüber steht jedoch die zunehmend realistischere Darstellung des Verkehrssystems, die somit zu einer höheren externen Validität der Ergebnisse beiträgt. Diese beiden Aspekte müssen bei der Entscheidung über die Größe einer Pulksimulation gegeneinander abgewogen werden.

8.4 Versuchsdurchführung

8.4.1 Instruktion

In der Instruktion wird den Probanden Sinn und Zweck des Versuchs sowie dessen Ablauf erklärt. In den Versuchen der Pulksimulation wurden alle Probanden eines Termins meist gemeinsam instruiert, da dies ökonomischer ist als eine Einzelinstruktion. So wird auch gewährleistet, dass jeder Proband dieselben Inhalte erfährt. Um die Instruktion in der Gruppe für alle Fahrer übersichtlich zu halten, haben sich vergrößerte Illustrationen wie z. B. mit Hilfe eines Flipcharts bewährt.

Manchmal sind separate Instruktionen der Fahrer allerdings nicht zu umgehen. Dies wurde beispielsweise in der Studie zum Ampelphasenassistenten verwendet, da die Fahrer nicht die Systemausstattung bzw. die Fahraufgabe der anderen Fahrer wissen sollten. Da auch im realen Verkehr ein Fahrer nichts über die Hintergründe und Motive der anderen Verkehrsteilnehmer (z. B. Termindruck) weiß, ist dies die realistischste Ausgangssituation für eine Versuchsfahrt. Nachteilig bei einer Einzelinstruktion ist jedoch, dass die Fahrer nur nacheinander instruiert werden können und somit Wartezeiten entstehen.

8.4.2 Operatorenplatz und Versuchsleitung

Der Operatorenplatz der Pulksimulation wurde im Rahmen mehrerer Vorversuche entwickelt und sukzessive erweitert. Die verschiedenen Möglichkeiten und Anforderungen wurden in Kapitel 4.3 ausführlich vorgestellt. Das dargestellte Konzept hat sich in den berichteten Studien bewährt.

8.4.3 Erfassung subjektiver Daten

Die Durchführung eines Versuchstermins mit mehreren Probanden gleichzeitig hat den Vorteil, dass wesentlich ökonomischer als in Einzelversuchen subjektive Daten erhoben werden können. Dies trifft insbesondere für Fragebögen zu, die ausgeteilt und vom Probanden selber ausgefüllt werden. Diese Methode wurde daher in allen beschriebenen Versuchen verwendet.

Schwieriger dagegen ist die Durchführung von Interviews. Da das Verhältnis zwischen Versuchsleiter und Probanden in den durchgeführten Studien stets 1:2 betrug, wurde nicht jeder der Fahrer einzeln und gleichzeitig befragt. Stattdessen wurde meist auf Gruppeninterviews zurückgegriffen, in denen ein Versuchsleiter zwei Fahrer gleichzeitig befragte. Nachteil dieser Methode ist, dass die Antworten der beiden Probanden nicht unabhängig voneinander zu sehen sind, da soziale Einflüsse bei der Antwortabgabe eine Rolle spielen können.

Um subjektive Daten während der Fahrt zu erhalten, wird häufig auf verbale Online-Befragungen zurückgegriffen, in denen der Versuchsleiter den Probanden direkt beim Fahren befragt. Dies ist in Versuchen mit mehreren Probanden nur bedingt möglich, da die Versuchsleiter die Fahrer nur jeweils nacheinander und nicht direkt im Anschluss an die Prüfsituationen befragen könnten. Daher wurde in der Pulksimulation auf Befragungen zurückgegriffen, die dem Fahrer auf einem Display während der Fahrt präsentiert wurden. Der Fahrer gab seine Antwort durch Drücken eines entsprechenden Feldes auf dem Touchpad ab (siehe Kapitel 7.1.2.6). Dies hat sich bewährt, allerdings sollte aufgrund der Ablenkungsgefahr die Befragung nicht zu lange dauern und ausschließlich während nicht-auswertungsrelevanter Streckenabschnitte erfolgen.

Als weitere Möglichkeit zur Erfassung von subjektiven Daten wurde die Lenkradwippe genutzt. In der Studie zum Ampelphasenassistenten (siehe Kapitel 7.2) sollten die Probanden diese immer dann ziehen, wenn eine Fahrsituation ärgerlich war. Somit können durch diese Methode mehrere Fahrer gleichzeitig subjektive Daten abgeben, ohne dass die Versuchsleiter hier agieren müssen.

8.5 Datenanalyse

8.5.1 Möglichkeiten der Datenerfassung und -darstellung

Gegenüber der Einzelfahrsimulation erweitert der gleichzeitige Einsatz mehrerer Fahrer in einer Untersuchung die Auswertungsmöglichkeiten: Zum einen sind, wie in der Einzelfahrsimulation, Parameter zur Beschreibung des Fahrerverhaltens über den Zeitverlauf berechenbar (sog. Einzelfahrzeugmessung). Dies sind beispielsweise Maße wie die SDLP oder der minimale Time-Headway pro Fahrzeug. Zusätzlich sind Parameter zur Beschreibung des gesamten Fahrerpulks und dessen Interaktionen möglich. Diese Maße können zur Erfassung des Verkehrsablaufs dienen und konnten bisher ausschließlich in der Verkehrssimulation oder in aufwändigen Realstudien erhoben werden.

Schnabel und Lohse (1997) nennen drei Methoden, die man zu diesem Zweck einsetzen kann:

- (1) Momentane Messung: Erfassung über alle Fahrzeuge zu einem Messzeitpunkt (z. B. mittlere Geschwindigkeit zu einem Messzeitpunkt)
- (2) Lokale Messung: Erfassung über alle Fahrzeuge zu einem Streckenmeter (z. B. mittlere Geschwindigkeit im Straßenquerschnitt)
- (3) Räumlich-zeitliche Messung: Erfassung über alle Fahrzeuge über einen Zeitverlauf und einen Streckenabschnitt (z. B. Verkehrsdichte)

Die momentane Messung ist in der Pulksimulation leicht durchführbar, da die Aufzeichnungsfrequenz von SILAB (wie auch in den meisten anderen Fahrsimulationssoftwares) zeitlich bestimmt wird. Diese liegt bei 60 Hz – somit wird 60-mal pro Sekunde jeder Parameter pro Fahrstation erfasst. Die Daten liegen damit zu synchronisierten Messzeitpunkten vor und gewährleisten eine optimale momentane Messung. Diese ist zu empfehlen, wenn der Zustand des Pulks zu einem Zeitpunkt beschrieben werden soll. Für die Reaktion des Pulks auf ein Ereignis sind mehrere momentane Messungen in festen Takten (z. B. im Sekundentakt) notwendig. Unter den vorliegenden Studien wurde dies in ähnlicher Weise bei der Untersuchung des Gefahrenwarners verwendet (Kapitel 7.1).

Für die lokale Messung muss der Datensatz transformiert werden, da sich die Fahrzeuge pro Messzeitpunkt an unterschiedlichen Positionen auf der Strecke befinden: Die Daten müssen somit nach Streckenmeter synchronisiert werden. Da für eine Synchronisierung jedoch identische Werte im Streckenmeter notwendig sind und diese nicht immer vorliegen, muss zuvor eine Interpolation der Messwerte erfolgen. Die lokale Messung ist zur Beschreibung konkreter Streckensituationen geeignet. In Abbildung 48 beispielsweise wird das Umfahren eines Hindernisses durch den Pulk dargestellt. Andere Fragestellungen, in denen die lokale Messung verwendet werden kann, sind z. B. die Annäherung an ein Stauende oder an eine Kreuzung.

Die räumlich-zeitliche Messung dient zur Bestimmung von Parametern wie der Verkehrsstärke oder Verkehrsdichte. In der Pulksimulation sind diese Kenngrößen aufgrund der Anzahl von fünf Fahrstationen nicht sinnvoll berechenbar. Stattdessen können aber Einzelfahrzeugmessungen aggregiert werden, um dadurch Aussagen zum Verkehrsfluss innerhalb eines Zeit- und Streckenabschnitts zu erhalten (z. B. die mittlere Reisezeit über eine bestimmte Strecke).

Für die Darstellung dieser Messungen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Bei momentanen und lokalen Messungen werden Verläufe eines Parameters nach Messzeitpunkt bzw. Streckenmeter verwendet (siehe Abbildung 95 oben für eine exemplarische Darstellung). Daneben existiert die kombinierte Betrachtung in Zeit-Weg-Diagrammen (siehe Abbildung 95 unten). Hier ist der Verlauf jedes einzelnen Fahrzeugs dargestellt. Aus der Steilheit der Kurven kann auf die Fahrgeschwindigkeiten geschlossen werden. Der vertikale Abstand der Kurven stellt dem räumlichen Abstand zwischen den Fahrzeugen zu einem Messzeitpunkt und der horizontale Abstand den zeitlichen Abstand zwischen den Fahrzeugen zu einem Streckenmeter dar. Somit können mit einem Zeit-Weg-Diagramm auch Interaktionen zwischen Fahrern analysiert werden, da Zeit, Bremsen, Beschleunigen sowie die Abstände der Fahrer zueinander ablesbar sind (siehe hierzu auch Kapitel 6.3.8).

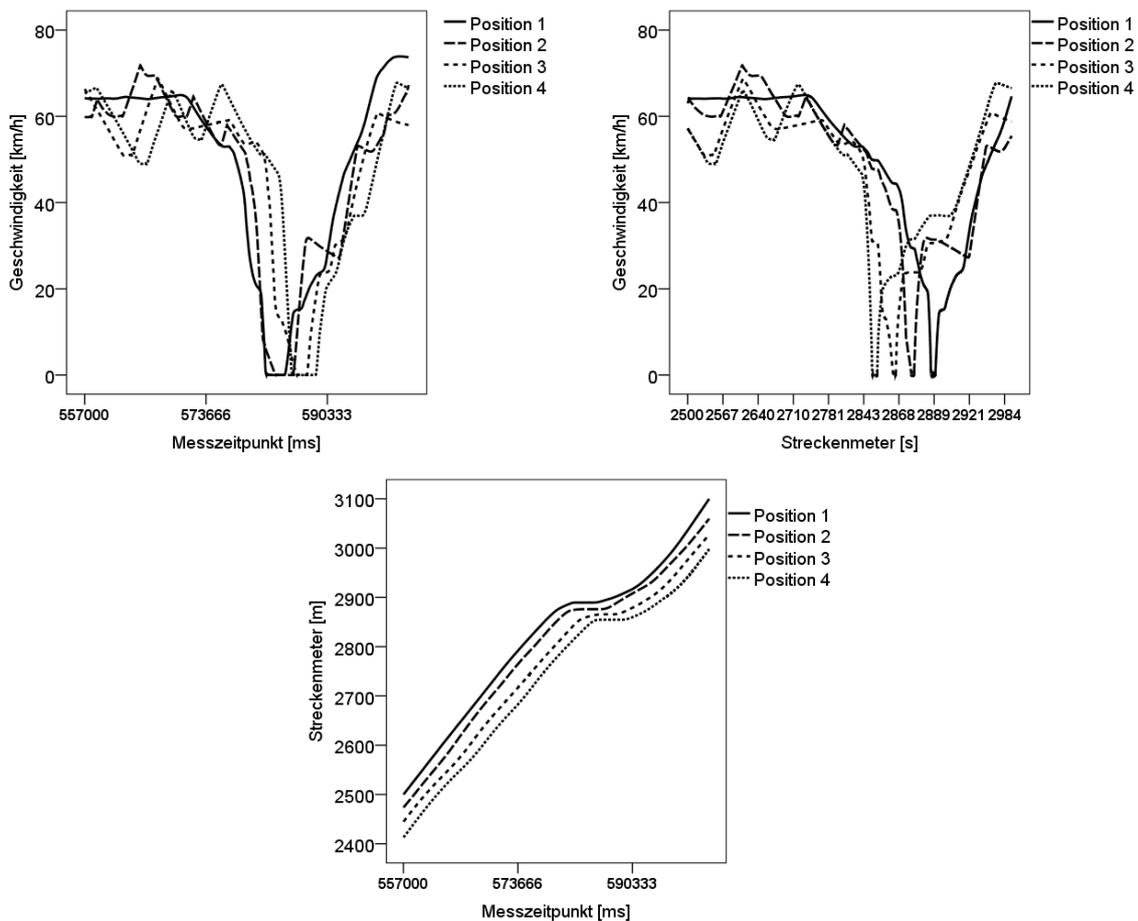


Abbildung 95: Geschwindigkeitsverläufe der vier Fahrer eines Pulks nach Messzeitpunkt (oben links) bzw. nach Streckenmeter (oben rechts) sowie Zeit-Weg-Diagramm (unten) in jeweils derselben Situation (Folgefahren mit Abbremsen am unerwarteten Hindernis „Pannenfahrzeug“).

8.5.2 Parameter zur Beschreibung des gesamten Pulks

Die Integration mehrerer Fahrstationen erlaubt es im Vergleich zur Einzelsimulation, neue Parameter für die Beschreibung und Auswertung des Fahrens anzuwenden. So wurden in einem ersten Schritt in dieser Arbeit Parameter zur Beschreibung eines Fahrerpulks entwickelt. Für die Querführung waren dies die laterale Distanz und die $SDLP_{\text{Pulk}}$ (siehe Kapitel 6.3.7.1):

- Die **laterale Distanz** misst die Fahrbreite des Pulks. Da letztendlich nur die zwei lateral am äußersten fahrenden Fahrzeuge in die Berechnung eingehen, ist sie sehr ausreißerempfindlich. Es spielt keine Rolle, an welchen lateralen Positionen sich die mittleren Fahrzeuge befinden. Für größere Pulks aus mehreren Fahrzeugen ist somit zu überlegen, ob ein gestutzter Wert verwendet werden sollte, da dieser weniger ausreißerempfindlich wäre. Eine 80 %-Laterale Distanz würde somit die am extremsten fahrenden 20 % der Fahrzeuge aus der Berechnung ausschließen.

Ein Vorteil der lateralen Distanz ist, dass das Verhalten des Pulks in diesem Parameter anschaulich in „Schlauchdiagrammen“ (siehe z. B. Abbildung 47 rechts) dargestellt werden kann.

- Eine sinnvolle Ergänzung hierzu ist die $\text{SDLP}_{\text{Pulk}}$. Diese stellt die Variation der lateralen Positionen der Fahrzeuge im Pulk dar. Da hier somit alle Werte in die Berechnung eingehen, ist dieser Parameter weniger ausreißerempfindlich als die laterale Distanz.

Je kleiner diese beiden Parameter ausfallen, desto homogener ist das Fahrverhalten im Pulk bezüglich der Querregelung. Dies bedeutet, dass die Fahrer verstärkt genau hintereinander fahren. Aussagen zur Spurhaltung der Fahrzeuge können diese Parameter dagegen nicht machen. Wenn der Pulk stark schwankt und somit eine schlechte Spurhaltung besitzt, kann das laterale Verhalten trotzdem homogen sein, wenn die Fahrer strikt hintereinander folgen.

Bezüglich der Längsführung wurden ebenfalls zwei Parameter entwickelt (siehe Kapitel 6.3.7.1):

- Die **Pulklänge** wird definiert als der Abstand des ersten Fahrers zum letzten Fahrer. Somit ist sie stark ausreißerempfindlich. Daher ist hier wie bei der lateralen Distanz eine gestutzte Pulklänge denkbar. Starke Geschwindigkeitswechsel gehen mit Veränderungen der Pulklänge einher, da bei höheren Geschwindigkeiten gewöhnlich größere Abstände gehalten werden: Bremsst der Pulk ab, wird die Pulklänge geringer. Beschleunigen die Fahrer, steigt der Parameter wieder an.
- Der THW_{Pulk} bezeichnet den zeitlichen Abstand zwischen dem ersten und letzten Fahrzeug und ist daher auch ausreißerempfindlich. Jedoch ist der THW_{Pulk} weniger stark abhängig von der Geschwindigkeit der Fahrer als die Pulklänge.

Neben diversen Lagemaßen wie Mittelwert oder Median ist bei der Längsführung vor allem die Variation der Parameter interessant. Eine hohe Variation bedeutet, dass sich der Pulk immer wieder ausdehnt und zusammenzieht, ähnlich wie eine Sprungfeder. Die Variation misst somit die Elastizität des Pulks. Ist die Variation dagegen gering, bleiben die Abstände eher konstant und der Pulk ist starr.

Neben diesen Gruppenparametern sind auch aggregierte Maße der Einzelfahrzeuge zur Beschreibung des Pulks denkbar. Hier können viele Maße herangezogen werden, die auch in der Verkehrssimulation Anwendung finden. Häufig sind dies Variationsmaße, um die Homogenität des Verkehrsflusses zu bestimmen (wie z. B. die Standardabweichung von Abständen oder Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten). Daneben können auch aggregierte Lagemaße berechnet werden, wie z. B. Durchschnittsgeschwindigkeiten.

8.5.3 Parameter zur Beschreibung von Interaktionen

Ein Anwendungsbereich der Pulksimulation ist die Betrachtung von Interaktionen zwischen Fahrern. Hierdurch können beispielsweise kooperative Verhaltensweisen im Straßenverkehr betrachtet werden. Für eine Quantifizierung dieser Interaktionen (z. B. weniger vs. mehr kooperativ) sind jedoch geeignete Parameter notwendig. Daher müssen diese entwickelt werden, um Interaktionen ganzheitlich untersuchen zu können.

In Kapitel 7.2 wurde dies exemplarisch für Ärger über andere Verkehrsteilnehmer betrachtet. Hierfür wurde der Verlauf der Differenzgeschwindigkeit zwischen zwei folgenden Fahrzeugen herangezogen und in Verbindung gebracht mit der Wippennutzung als Zeichen für Ärger. Dieses Beispiel zeigt, dass für die Untersuchung von Interaktionen für manche Fragestellungen Parameter verschiedener Datenebenen integriert betrachtet werden müssen.

In Kapitel 6.3.8 wurde das Interaktionsverhalten an Kreuzungen untersucht. Aus der Analyse der Zeit-Weg-Diagramme ist erkennbar, dass sich Interaktionen immer über eine gewisse Zeitspanne ereignen. Daher ist nötig, sich ein Zeitintervall und nicht nur einen Zeitpunkt zu betrachten, da eine Interaktion immer aus einer Aktion von Fahrer X und einer darauf später folgenden Reaktion von Fahrer Y besteht. Möglicherweise erfolgt hierauf wieder eine Reaktion von Fahrer X. Ein Beispiel für eine derartige Interaktion wäre: Fahrer X bremst ab, Fahrer Y verkürzt den Abstand und fährt dicht auf, Fahrer X wechselt die Fahrspur.

Zuletzt bleibt als weitere Schwierigkeit bei der Entwicklung derartiger Parameter, dass es nicht „den einen“ Interaktionsparameter gibt, wie am Beispiel von Kooperation leicht zu sehen ist: Zum einen ist ein Maß für eine kooperative Verhaltensweise anders aufgebaut als ein Parameter für eine aggressive Interaktion. Zum anderen können sich kooperative Interaktionen wiederum je nach Fahrsituation in verschiedenen Verhaltensweisen zeigen (z. B. Spurwechsel, Lichthupe, Abbremsen).

Es bleibt als Herausforderung für weitere Studien, diese Überlegungen zu berücksichtigen und dadurch letztendlich geeignete Parameter zur Beschreibung von Interaktionen zu entwickeln.

8.6 Dateninterpretation

Wie in Kapitel 2.1.1 schon berichtet, gehören interne und externe Validität zu den wichtigsten Gütekriterien für Untersuchungen. Besitzen Studien keine interne Validität, sind die Ergebnisse nicht eindeutig interpretierbar. Wenn Studien keine externe Validität besitzen, sind ihre Ergebnisse nicht verallgemeinerbar und stellen demzufolge die gesamte Untersuchung in Frage.

8.6.1 Interne Validität der Ergebnisse

Die interne Validität sinkt mit wachsender Anzahl nicht kontrollierter Störvariablen. Für Studien in der Pulksimulation sind im Wesentlichen drei Arten von Störvariablen zu diskutieren: (1) Die eingeschränkte Kontrollierbarkeit der Fahrsituation, (2) der Faktor „Zeit“ sowie (3) die soziale Situation.

Die Fahrsituation in der Pulksimulation ist nur eingeschränkt kontrollierbar. Zwar sind die äußeren Rahmenbedingungen wie Wetter und simulierter Umgebungsverkehr konstant, allerdings unterscheiden sich die Situationen für jeden Fahrer in Abhängigkeit des realgesteuerten Umgebungsverkehrs. So können die Abstände zwischen den Fahrern beim Folgefahren trotz Instruktion variieren oder sich die Geschwindigkeiten von Pulks je nach Führungsfahrzeug

unterscheiden. Beim Folgefahren wird die Variabilität der Situation mit steigender Positionierung aufgrund der zunehmenden Anzahl realer Fahrer im Pulk größer (siehe Kapitel 6.3.3.2).

In Studien mit Auftrennen und erneutem Zusammenführen des Pulks können die Reihenfolgen der Fahrer beim Folgefahren eine zusätzliche Störvariable darstellen, wenn sie nicht kontrolliert werden. Die Kontrolle der Positionierungen kann durch verschiedene Fahrten erfolgen, in denen die Reihenfolge gezielt variiert wird (wie z. B. in der in Kapitel 6.3.3 beschriebenen Studie). Eine Alternative hierzu stellt Abbildung 96 dar. Ein Schild über der Straße bildet die vier durch unterschiedliche Farben gekennzeichneten Fahrzeuge des Pulks nebeneinander ab. Zum Tausch der Positionen fahren die Fahrer an ihren entsprechenden Parkplatz unter dem Schild. Wenn alle Fahrer angekommen sind, gibt der Versuchsleiter per Mikrofon das Signal zum Weiterfahren. Der Fahrer ganz links beginnt und die anderen reihen sich dahinter ein. Durch eine variable Gestaltung des Schildes kann dadurch immer die gewünschte Reihenfolge hergestellt werden.



Abbildung 96: Schild als Möglichkeit zur Kontrolle der Positionierungen. Die Fahrer ordnen sich gemäß den Farben ihres Fahrzeugs unter dem Schild ein und starten in Kolonnenformation, beginnen von links. Die Darstellung auf dem Schild wird entsprechend der gewünschten Reihenfolge gestaltet.

Die Stärke der Pulksimulation besteht in der Realisierung sozialer Interaktionen im Straßenverkehr. Beispiele hierfür sind Überholmanöver, Queren an einer Kreuzung, Einfädeln lassen auf der Autobahn oder Folgefahren auf der Landstraße. Mit Ausnahme des Folgefahrens auf der Landstraße stellen alle diese Szenarien normalerweise nur kurze Episoden dar, in denen sich zwei Fahrer begegnen und anschließend wieder trennen. Im nächsten Interaktionsszenario trifft jeder Fahrer wieder auf einen anderen Fahrer, der sich komplett anders verhalten kann als der erste Interaktionspartner. Daher spielen im realen Straßenverkehr längerfristige Effekte wie Lernen oder Erfahrung in Interaktionen nur eine untergeordnete Rolle. In der Pulksimulation dagegen interagiert der Proband immer wieder mit denselben Fahrern. Hierdurch lernt er ihr Fahrverhalten kennen (z. B. unsicher, sportlich, kooperativ) und passt möglicherweise sein Interaktionsverhalten im Laufe des Versuchs darauf an.

Ebenso lernen sich die Fahrer auch außerhalb des Fahrens vor dem Versuch und während der Pausen kennen. Es entstehen Sympathie oder Antipathie, welche wiederum das Fahrverhalten beeinflussen (so ist wahrscheinlich, dass ein Proband eher kooperatives Fahrverhalten zeigt,

wenn er die anderen Probanden sympathisch findet). Möchte man diese Effekte ausschließen, müssen die Probanden voneinander abgeschottet werden. Allerdings bieten diese sozialen Versuchsumstände natürlich auch die Gelegenheit, dies gezielt als Möglichkeit zur Manipulation einzusetzen. So kann z. B. ein Vertrauter der Versuchsleitung negativ und unsympathisch auftreten, um so Ärger bei den Probanden zu induzieren. Anschließend können die Auswirkungen des Ärgers auf das Fahrverhalten untersucht werden.

8.6.2 Externe Validität der Ergebnisse

Die Prüfung der externen Validität erfolgt meist durch einen Vergleich der Resultate einer Studie mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen, die mit anderen Stichproben oder Methoden durchgeführt wurden. Daher soll die externe Validität der Pulksimulation auch auf diese Weise geprüft werden. Es wird verglichen, inwieweit die in dieser Arbeit berichteten Effekte mit Befunden aus der Literatur übereinstimmen.

In Kapitel 6.3.1 wurde gezeigt, dass eine Pulkfahrt anstrengender und schwieriger ist als eine Einzelfahrt. Hierbei fuhren die Probanden sowohl einzeln als auch in einem Viererpulk eine Landstraßenstrecke. Eine ähnliche Fragestellung untersuchten Mühlbacher, Messerschmidt, Totzke und Krüger (2010) im Realverkehr: Hier wurden, ebenfalls im abhängigen Vergleich, Einzelfahrten und Fahrten in einem Dreierpulk auf derselben Autobahnstrecke untersucht. Da in der Pulksimulation und im Realverkehr dieselben Fragebögen verwendet wurden, ist ein Vergleich der Ergebnisse möglich: Im Realverkehr zeigen sich nahezu identische Resultate wie in der Pulksimulation (siehe Abbildung 97). Auch hier ist eine Pulkfahrt signifikant anstrengender und schwieriger als eine Einzelfahrt. Weiterhin wurde im Realverkehr im Pulk langsamer gefahren als in der Einzelfahrt (Einzelfahrt: $M = 122.7$ km/h ($SD = 18.9$); Pulkfahrt: $M = 108.7$ km/h ($SD = 4.6$)). Dies hat sich ebenso in der Pulksimulation gezeigt.

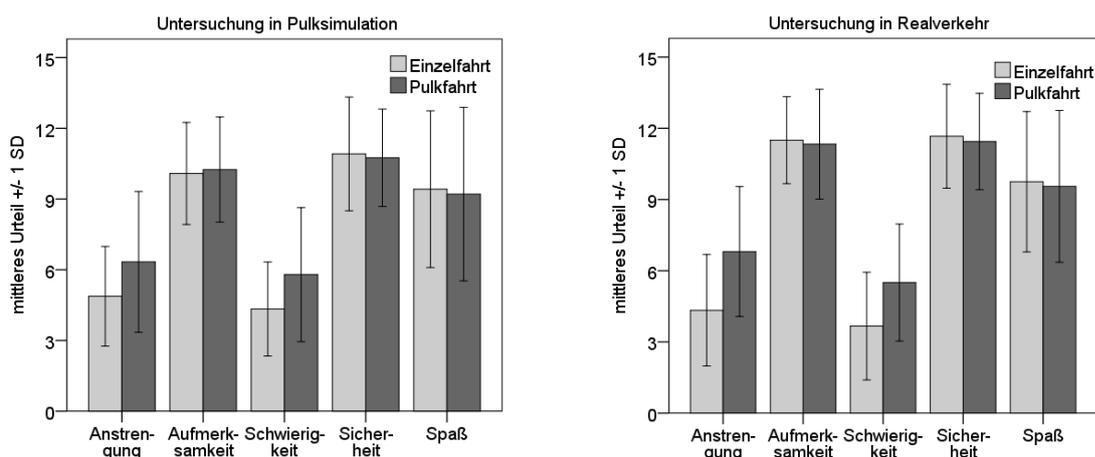


Abbildung 97: Urteile zu Einzel- und Pulkfahrt in Pulksimulation (links) und Realverkehr (rechts; aus Mühlbacher, Messerschmidt, Totzke & Krüger, 2010). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Bei Betrachtung der einzelnen Positionen ist in Kapitel 6.3.3 vor allem der Ziehharmonika-Effekt aufgefallen: Weiter hinten fahrende Fahrzeuge bremsen stärker und benötigen höhere maximale Geschwindigkeiten, um den Anschluss an den Pulk nicht zu verlieren. Ursache hierfür waren einzelne Fahrsituationen, in denen weiter hinten im Pulk sukzessive stärker gebremst wurde (siehe Abbildung 29). Dieses Phänomen ist vor allem aus der Stauforschung bekannt. Hier gelten derartige Situationen als Auslöser für den „Stau aus dem Nichts“ (z. B. Nagel & Schreckenberg, 1992), wie bereits in Kapitel 8.1.1 beschrieben. Durch Videobeobachtung von Autobahnabschnitten konnten diese Effekte auch im Realverkehr beobachtet werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 98 dargestellt. Während die ersten Fahrzeuge im linken Teil der Abbildung nur leicht abbremsen, müssen die folgenden Fahrzeuge immer stärker ihre Geschwindigkeiten letztendlich bis in den Stand verringern. Die hierdurch resultierenden Standzeiten nehmen sukzessive zu. Somit ist der berichtete Effekt der stärkeren Bremsungen und zunehmenden Geschwindigkeitsschwankungen beim Folgefahren auch im Realverkehr bekannt. Dieses Phänomen eröffnet weitere Felder zum Einsatz der Pulksimulation in der Untersuchung von Stautentstehung und -entwicklung.

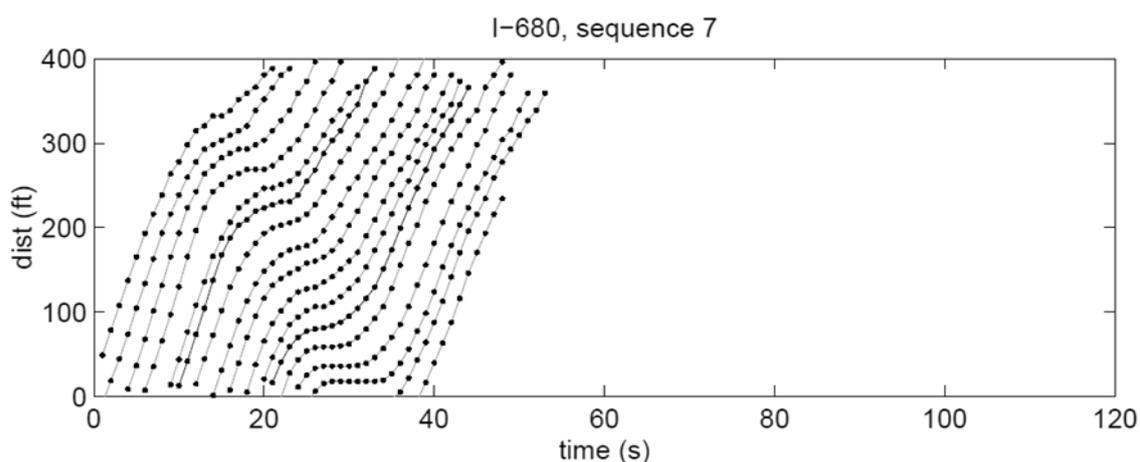


Abbildung 98: Zeit-Weg-Trajektorien einzelner Fahrzeuge auf einem amerikanischen Highway (Abszisse: Zeit in Sekunden, Ordinate: zurückgelegte Strecke in Fuß; aus Coifman, 1996, S. 12). Die Geschwindigkeit kann durch die Steigung der Trajektorie bestimmt werden: Je steiler eine Trajektorie, umso schneller wird gefahren. Eine waagrechte Trajektorie bedeutet Stillstand des Fahrzeugs.

In Kapitel 6.3.5 wurde untersucht, wie sich die Einführung einer kognitiven Nebenaufgabe auf den Pulk auswirkt. Bezüglich der lateralen Kontrolle zeigen sich positive Effekte: Mit kognitiver Beanspruchung verringert sich die Spurschwankung und die Fahrer verlassen seltener die Fahrbahn. Auch diese Ergebnisse sind übereinstimmend mit mehreren Befunden aus der Literatur (z. B. Jamson & Merat, 2005; Liang & Lee, 2010).

Die Evaluation des Gefahrenwarners in der Pulksimulation ermöglicht ebenfalls einen Vergleich zu einer anderen Studie: Im Rahmen des Projekts sim^{TD} wurde ein elektronisches Bremslicht untersucht, welches ähnlich wie der Gefahrenwarner vor Bremsungen vorausfahrender Fahrzeuge warnte. In einer Untersuchung in der Einzelfahrsimulation (sim^{TD} , 2013) wurde hierzu die Position des Probanden in einer Fahrzeugkolonne aus simuliertem

Umgebungsverkehr variiert: Entweder fuhr der Proband unmittelbar hinter dem auslösenden bremsenden Fahrzeug oder es befanden sich noch zwei weitere simulierte Fahrzeuge dazwischen. Waren Fahrzeuge dazwischen, konnte eine positive Sicherheitswirkung des Systems erzielt werden: Es wurde zeitlich früher gebremst, was in größeren minimalen TTCs resultierte. Bei Bremsungen direkt hinter dem auslösenden Fahrzeug gab es keine bzw. unter Umständen sogar eine negative Sicherheitswirkung. Diese Ergebnisse sind den in Kapitel 7.1 berichteten Befunden ähnlich. Auch in der Pulksimulation steigt der Nutzen des Gefahrenwarners mit zunehmendem Abstand in der Kolonne zum auslösenden Fahrzeug.

Zusammenfassend berichten andere Studien im Realverkehr oder in der Einzelfahrsimulation Ergebnisse, die mit den in dieser Arbeit geschilderten übereinstimmen. Dies spricht dafür, dass die externe Validität in der Pulksimulation gegeben ist.

9 AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit stellt einen ersten Schritt dar, eine Methodik für die Pulksimulation zu entwickeln und zu prüfen. In diversen methodisch und inhaltlich geleiteten Untersuchungen wurden erste Erfahrungen mit dieser neuen Art der Fahrsimulation gemacht. Die methodische Entwicklung ist allerdings noch nicht abgeschlossen und es bleiben mehrere Aspekte bei Planung, Durchführung und Auswertung von Studien in der Pulksimulation, die noch untersucht werden müssen. Trotzdem stellt die Pulksimulation als Ergebnis der vorliegenden Arbeit das bisher fehlende Bindeglied zwischen Fahr- und Verkehrssimulation dar. Sie kann zum einen als Fahrsimulation mit Erweiterung des Faktors „Verkehr“ bzw. als Verkehrssimulation mit Erweiterung um den Faktor „Mensch“ angesehen werden.

Im Gegenzug ermöglicht die Pulksimulation eine Weiterentwicklung der Fahr- und Verkehrssimulation. Die dort verwendeten Modelle ändern ihr Fahrverhalten in Abhängigkeit von anderen Fahrzeugen nicht oder nur wenig und führen lediglich vordefiniertes Verhalten aus. So wurden auch Interaktionen bisher in den Modellen nicht berücksichtigt. Mit der Pulksimulation existiert nun eine Methode, die in der Lage ist, Interaktionen zwischen Fahrern zu beschreiben. Basierend auf diesen Erkenntnissen können neue interaktive Fahrermodelle entwickelt werden, die wieder in die Fahr- und Verkehrssimulation einfließen können und dem dortigen Verkehr ein höheres Maß an realistischem Verhalten geben würden. Beispielsweise könnte das Modell nach Wiedemann (1974) um den Faktor der Positionierung erweitert werden, sodass mehr als ein Vorderfahrzeug beim Folgefahren mit berücksichtigt wird.

Die Betrachtung von sozialen Interaktionen zwischen mehreren Fahrern ist ein neues Gebiet der Verkehrspsychologie. Bisher war die Ausrichtung eher auf Erleben und Verhalten des einzelnen Fahrers gerichtet. Mit der Pulksimulation steht nun eine Methode zur Verfügung, welche die Betrachtung sozialer Interaktionen zwischen Fahrern ermöglicht. Dies ist zwingend notwendig, da Interaktionen als wesentlicher Bestandteil des Lebens auch im Straßenverkehr eine große Rolle spielen. Insofern ermöglicht die Pulksimulation den Schritt der Verkehrspsychologie von der Allgemeinen Psychologie, in der die grundlegenden Funktionen des Menschen untersucht werden, hin zur Sozialpsychologie, in der die Auswirkungen sozialer Interaktionen auf Erleben und Verhalten betrachtet werden. Dies führt natürlich auch zur Möglichkeit, sozialpsychologische Fragestellungen im Verkehrskontext zu untersuchen.

Neben der Berücksichtigung anderer psychologischer Disziplinen kann es für die Erforschung sozialer Interaktionen im Straßenverkehr zusätzlich hilfreich sein, Einblicke in andere Wissenschaften zu werfen. Hier sind vor allem diejenigen Fachrichtungen relevant, bei denen ebenfalls Interaktionen zwischen mehreren Akteuren von Belang sind oder mehrere Elemente

gemeinsame Wege absolvieren. Hier ist die Soziobiologie zu nennen, welche das Sozialverhalten z. B. von Bienen oder Ameisen betrachtet. In der Teilchenphysik werden die Bewegungen und das Zusammenspiel von Elementarteilchen analysiert. Teilgebiete der Medizin untersuchen die Übertragung von Krankheiten und die Verbreitung von Epidemien. In der Panikforschung wird das Fluchtverhalten von Menschen in Katastrophensituationen modelliert. Alle diese Wissenschaften haben ihre eigenen Methoden. Es existieren jeweils spezifische Parameter, mit denen der entsprechende Beobachtungsgegenstand beschrieben werden kann. Möglicherweise können hier Analogien gezogen werden, um Kenngrößen zu entwickeln, mit denen soziale Interaktionen im Straßenverkehr dargestellt, quantifiziert und bewertet werden können.

Für die inhaltliche Weiterverwendung der Pulksimulation in der Verkehrspsychologie existieren viele weitere Optionen. Erste Vorschläge wurden bereits in Kapitel 8.1.1 genannt. Neben den dort beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten sind auch Erweiterungen der Pulksimulation denkbar, die völlig neue Fragestellungen erlauben:

- Im städtischen Verkehr ereignen sich viele Interaktionen mit Fußgängern und Fahrradfahrern. Daher ist für eine ganzheitliche Betrachtung des urbanen Raums in einer virtuellen Umgebung auch die Einbindung von Fußgänger- und Fahrradsimulatoren notwendig.
- Motorräder und LKWs sind ein wichtiger Bestandteil des Verkehrs. Motorräder beschleunigen wesentlich schneller als PKWs, sind aber schlechter erkennbar. LKWs beschleunigen geringer und fahren langsamer. Eine Integration von Motorrad- und LKW-Fahrsimulatoren in die Pulksimulation eröffnet daher Möglichkeiten für weitere Interaktionsfragestellungen.
- Oft spielt die Variabilität von Fahrzeugmotorisierungen eine wichtige Rolle bei Interaktionen. So entstehen beispielsweise aufgrund des Überholens durch ein langsames Fahrzeug Konfliktsituationen, da dieses Fahrzeug nachfolgende schnellere Fahrzeuge blockiert. Für eine Betrachtung dieser Interaktionen müssen die Simulatorfahrzeuge mit unterschiedlichen Fahrzeugmodellen versehen werden.

Darüber hinaus kann die Anzahl der PKW-Fahrstationen erhöht werden. Hierdurch kann das Verkehrsgeschehen noch realistischer dargestellt werden, da auf Verhaltensmodelle komplett verzichtet werden kann und ausschließlich reale Fahrer in der virtuellen Welt agieren würden.

Letztendlich kann durch diese genannten Erweiterungen das Ziel einer Abbildung des realistischen Verkehrsgeschehens in einer simulierten Umgebung erreicht werden. Die Pulksimulation wird dadurch zu einer Verkehrssimulation mit realen Fahrern.

10 LITERATURVERZEICHNIS

- Åberg, L., Larsen, L., Glad, A., & Beilinson, L. (1997). Observed vehicle speed and drivers' perceived speed of others. *Applied Psychology: An International Review*, 46(3), 287-302.
- Allen, R. W., Rosenthal, R., & Cook, M. L. (2011). A short history of driving simulation. In D. L. Fisher (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine and psychology*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- Alm, H., & Nilsson, L. (1995). The effects of a mobile telephone task on driver behaviour in a car following situation. *Accident Analysis & Prevention*, 27(5), 707-715.
- American Psychological Association. (1973). *Ethical principles in the conduct of research with human participants*. Washington, D.C.
- Anund, A., & Kircher, K. (2009). Advantages and disadvantages of different methods to evaluate sleepiness warning systems. In VTI (Hrsg.), *VTI rapport 664A*. Linköping: VTI.
- Archer, J., & Kosonen, I. (2000). *The potential of micro-simulation modelling in relation to traffic safety assessment*. Vortrag auf der ESS conference, Hamburg.
- Baxter, J. S., Macrae, C. N., Manstead, A. S., & Stradling, S. G. (1990). Attributional biases and driver behaviour. *Social Behaviour*, 5(3), 185-192.
- Benmimoun, A., Neunzig, D., & Maag, C. (2004). *Effizienzsteigerung durch professionelles/partnerschaftliches Verhalten im Straßenverkehr*. FAT-Schriftenreihe Nr. 181. Frankfurt/Main: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
- Benmimoun, M., Fahrenkrog, F., Zlocki, A., & Eckstein, L. (2011). *Incident detection based on vehicle CAN-data within the large scale field operational test "euroFOT"*. Vortrag auf der 22nd enhanced safety of vehicles conference, Washington D.C.
- Berg, G., Karl, I., & Färber, B. (2011). Vehicle in the Loop. Validierung der virtuellen Realität. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), 6. *VDI-Tagung "Der Fahrer im 21. Jahrhundert"* (S. 143-154). Braunschweig: VDI-Verlag.
- Blaauw, G. J. (1982). Driving experience and task demands in simulator and instrumented car: A validation study. *Human Factors*, 24(4), 473-486.
- Bock, T. (2009). Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 76-83). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

- Bonnard, A., & Brusque, C. (2008). Naturalistic driving observations to investigate distraction exposure and IVIS patterns of use: interests and constraints of the approach. In C. Brusque (Hrsg.), *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems* (S. 43-52). Lyon: HFES.
- Bortz, J., & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Box, G. E. P., & Draper, N. R. (1987). *Empirical model-building and response surfaces*. New York: Wiley.
- Breuer, J. (2009). Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 55-68). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Brookhuis, K. A., de Vries, G., & de Waard, D. (1991). The effects of mobile telephoning on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 23(4), 309-316.
- Carsten, O., & Jamson, A. H. (2011). Driving simulators as research tools in traffic psychology. In B. E. Porter (Hrsg.), *Handbook of traffic psychology*. (S. 87-96). San Diego, CA US: Elsevier Academic Press.
- Chaloupka-Risser, C., Risser, R., & Zuzan, W. D. (2011). *Verkehrspsychologie: Grundlagen und Anwendungen*. Wien: facultas.wuv.
- Eidehall, A., Pohl, J., & Gustafsson, F. (2005). A new approach to lane guidance systems. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings IEEE conference on Intelligent Transportation Systems* (S. 108-112). Wien: IEEE.
- Ellinghaus, D. (1986). *Rücksichtslosigkeit und Partnerschaft. Eine sozialpsychologische Untersuchung über den Umgang unter Kraftfahrern im Straßenverkehr (12)*. Köln: Uniroyal-Verkehrsuntersuchung.
- Engström, J., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 97-120.
- Friedrich, M., Nause, D., Heesen, M., Keich, A., Kelsch, J., Baumann, M., & Vollrath, M. (2013). *Evaluation und Validierung des MoSAIC-Fabrsimulators*. Vortrag auf der 55. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Wien.
- Gouy, M., Diels, C., Reed, N., Stevens, A., & Burnett, G. (2012). The effects of short time headways within automated vehicle platoons on other drivers. In N. A. Stanton (Hrsg.), *Advances in Human Aspects of Road and Rail Transportation* (S. 529-538). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Gouy, M., Diels, C., Reed, N., Stevens, A., & Burnett, G. (2013). Do drivers reduce their headway to a lead vehicle due to the presence of platoons in traffic? A conformity study conducted within a simulator. *IET Intelligent Transport Systems journals*, 7(2), 230-235.

- Hancock, P. A., & De Ridder, S. N. (2003). Behavioural accident avoidance science: understanding response in collision incipient conditions. *Ergonomics*, 46(12), 1111-1135.
- Harbluk, J. L., Noy, Y. I., Trbovich, P. L., & Eizenman, M. (2007). An on-road assessment of cognitive distraction: impacts on drivers' visual behavior and braking performance. *Accident Analysis & Prevention*, 39(2), 372-379.
- Heesen, M., Baumann, M., Kelsch, J., Nause, D., & Friedrich, M. (2012). Investigation of Cooperative Driving Behaviour during Lane Change in a Multi-Driver Simulation Environment. In D. De Waard, K. A. Brookhuis, F. Dehais, C. Weikert, S. Röttger, D. Manzey, S. Biede, F. Reuzeau & P. Terrier (Hrsg.), *Human Factors of Systems and Technology*. Toulouse. Verfügbar unter <http://hfes-europe.org>.
- Heller, O. (1985). Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU). *Psychologische Beiträge*, 27(4), 478-493.
- Herrmann, T. (1999). Methoden als Problemlösungsmittel. In E. Roth, H. Holling & K. Heidenreich (Hrsg.), *Sozialwissenschaftliche Methoden: Lehr- und Handbuch für Forschung und Praxis* (S. 20-48). München: Oldenbourg.
- Hochstädter, A., Ehmanns, D., & Neunzig, D. (1999). *PELOPS as a Tool for Development and Configuration of Driver Assistance Systems*. Vortrag auf dem Euromotor Seminar "Telematic/Vehicle and Environment", Aachen.
- Hoffmann, S., & Buld, S. (2006). Darstellung und Evaluation eines Trainings zum Fahren in der Fahrsimulation. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* (S. 113-132). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Horrey, W. J., & Simons, D. J. (2007). Examining cognitive interference and adaptive safety behaviours in tactical vehicle control. *Ergonomics*, 50(8), 1340-1350.
- Houtenbos, M. (2008). *Expecting the unexpected: a study of interactive driving behaviour at intersections*. Dissertation, TU Delft.
- Howell, D. C. (2011). *Statistical Methods for Psychology* (8. Auflage). Belmont, CA: Wadsworth Cengage Learning.
- Jamson, A. H., & Merat, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 79-96.
- Jürgensohn, T. (1997). *Hybride Fahrermodelle*. Sinzheim: Pro-Universitate-Verlag.
- Klanner, F. (2008). *Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Klauer, S. G., Dingus, T. A., Neale, V. L., Sudweeks, J. D., & Ramsey, D. J. (2006). *The Impact of Driver Inattention on Near Crash/Crash Risk: An Analysis Using the 100-Car Naturalistic Driving Study Data*. Blacksburg, VA: VTTI.

- Kleine-Besten, T., Kersken, U., Pöchmüller, W., & Schepers, H. (2009). Navigation und Telematik. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 599-624). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Krajzewicz, D., & Wagner, P. (2004). Ansätze zur kognitiven Simulation eines Autofahrers. *MMI-Interaktiv* (7), 84-97.
- Krems, J., Henning, M., & Petzoldt, T. (2009). Methoden zur Messung von Fahrerverhalten: Vom Labor bis zur Feldstudie. In H. Winner & R. Bruder (Hrsg.), *Wie realitätsnah lässt sich Fahrerverhalten messen* (S. 103-111). Stuttgart: ergonomia.
- Lamble, D., Kauranen, T., Laakso, M., & Summala, H. (1999). Cognitive load and detection thresholds in car following situations: safety implications for using mobile (cellular) telephones while driving. *Accident Analysis & Prevention*, 31(6), 617-623.
- Laurig, W., & Luttmann, A. (1988). Planung und Durchführung von Feldstudien. In W. Rohmert & J. Rutenfranz (Hrsg.), *Die Bedeutung von Feldstudien für die Arbeitsphysiologie* (S. 67-78). Köln: O. Schmidt.
- Lefkowitz, M., Blake, R. R., & Mouton, J. S. (1955). Status factors in pedestrian violation of traffic signals. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 51(3), 704-706.
- Lerner, N. D. (1993). Brake perception-reaction times of older and younger drivers. In HFES (Hrsg.), *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 37th Annual Meeting* (S. 206-210). Santa Monica, CA: SAGE publications.
- Liang, Y., & Lee, J. D. (2010). Combining cognitive and visual distraction: Less than the sum of its parts. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 881-890.
- Lienert, G. A., & Ratz, U. (1998). *Testaufbau und Testanalyse*. Weinheim: Beltz.
- Löw, S. (2013). *Avatar oder Angst? Wahrgenommene Eigenschaften von virtuellen Agenten als Moderatoren des sozialen Einflusses in der virtuellen Realität*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Würzburg.
- Maag, C. (2013). Emerging Phenomena During Driving Interactions. In E. Mittleton-Kelly (Hrsg.), *Co-evolution of Intelligent Socio-technical Systems* (S. 185-217). Berlin: Springer.
- Maag, C., Krüger, H.-P., Breuer, K., Benmimoun, A., Neunzig, D., & Ehmanns, D. (2003). Aggressionen im Straßenverkehr In B. f. Straßenwesen (Hrsg.), *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Mensch und Sicherheit, Heft M151*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- Mühlbacher, D., Messerschmidt, J., Totzke, I., & Krüger, H.-P. (2010). *Fahren in einer Kolonne – Lieber einzeln oder gemeinsam in den Urlaub?* Vortrag auf der 52. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Saarbrücken.
- Mühlbacher, D., & Roche, F. (2013). *Wirkungsermittlung einer Car-to-Car-Warnung vor Gefahrenbremsungen - eine Realfabrstudie*. Vortrag auf der 55. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Wien.

- Mühlbacher, D., & Totzke, I. (2009). Geändertes Aufmerksamkeitsverhalten bei der Nutzung semi-autonomer Parkassistenten – Sind die Folgen sicherheitskritisch? In C. Stiller & M. Maurer (Hrsg.), *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS 2009* (S. 39-47). Karlsruhe: fmrt.
- 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 (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine and psychology* (S. 13.11 - 13.18). Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. *Journal De Physique I*, 2(12), 2221-2229.
- Neukum, A., & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), *Reifen-Fabrwerk-Fahrbahn* (S. 297-318). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Nowak, K. L., & Biocca, F. (2003). The effect of the agency and anthropomorphism on users' sense of telepresence, copresence, and social presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 12(5), 481-494.
- Olson, P. L., & Sivak, M. (1986). Perception-response time to unexpected roadway hazards. *Human Factors*, 28(1), 91-96.
- Ravaja, N., Saari, T., Turpeinen, M., Laarni, J., Salminen, M., & Kivikangas, M. (2006). Spatial Presence and Emotions during Video Game Playing: Does It Matter with Whom You Play? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 15(4), 381-392.
- Reiß, S., & Sarris, V. (2012). *Experimentelle Psychologie. Von der Theorie zur Praxis* (2. Auflage). München: Pearson.
- Rosenthal, R., & Rosnow, R. L. (1975). *The Volunteer Subject*. New York: John Wiley & Sons.
- Salvucci, D. D., & Gray, R. (2004). A two-point visual control model of steering. *Perception*, 33(10), 1233-1248.
- Schnabel, W., & Lohse, D. (1997). *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung* (Band 1). Berlin: Verlag für Bauwesen.
- Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (2001). The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 266-281.
- sim^{TD}. (2010). *Deliverable D41.1 Versuchsplan 1.0*. Öffentliches Deliverable.
- sim^{TD}. (2013). *Beschreibung und Auswertung des Anwendungsfalls A_2.2.3.4 elektronisches Bremslicht in der Fabrsimulation*. Unveröffentlichter Ergebnisbericht.
- Sonntag, K., Frieling, E., & Stegmaier, R. (2012). *Lehrbuch Arbeitspsychologie*. Bern: Verlag Hans Huber.

- Starke, A., & Hänsel, F. (2011). Vehicle in the loop - Fahrassistenzsysteme mit Virtual Reality im realen Fahrzeug testen, entwickeln und erleben. In Intelligente Transport- und Verkehrssysteme und -dienste Niedersachsen e.V. (Hrsg.), *AAET 2011 Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel* (S. 230-244). Braunschweig: ITS-Niedersachsen.
- Stoner, H. A., Fisher, D. L., & Mollenhauer, M. (2011). Simulator and scenario factors influencing simulator sickness. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (S. 13.11 - 13.18). Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- Strayer, D. L., & Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction: dual-task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone. *Psychological Science*, 12(6), 462-466.
- Stumpf, J. (2012). *Ampelphasenassistenz in der Pulksimulation - Auswirkungen auf Ärger und Fahrsicherheit bei anderen Verkehrsteilnehmern*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Würzburg.
- Taieb-Maimon, M., & Shinar, D. (2001). Minimum and comfortable driving headways: Reality versus perception. *Human Factors*, 43(1), 159-172.
- Törnros, J. (1998). Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel - a validation study. *Accident Analysis & Prevention*, 30(4), 497-503.
- Törnros, J., & Bolling, A. (2005). Mobile phone use-effects of handheld and handsfree phones on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 37(5), 902-909.
- Totzke, I., Mühlbacher, D., Buld, S., & Krüger, H.-P. (2010). *sim^{TD} (Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland): Empirische Wirkungsermittlung von Car-2-X-Technologien im Feldversuch und in der Fahrsimulation*. Vortrag auf dem 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen.
- Trapp, R. (2006). *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation*. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit.
- Treiber, M., Hennecke, A., & Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62(2), 1805-1824.
- Treiber, M., & Kesting, A. (2010). *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflusssimulation*. Berlin: Springer.
- van der Horst, R. (1991). Time-to-collision as a cue for decision-making in braking. In A. Gale (Hrsg.), *VISION IN VEHICLES--III* (S. 19-26). Amsterdam: Elsevier Science.
- Victor, T. (2005). *Keeping Eye and Mind on the Road*. Uppsala Universitet, Uppsala.
- Vogel, K. (2002). What characterizes a 'free vehicle' in an urban area? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(1), 15-29.

- Vollrath, M., & Krems, J. (2011). *Verkehrspsychologie : Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Weibel, D., Wissmath, B., Habegger, S., Steiner, Y., & Groner, R. (2008). Playing online games against computer- vs. human-controlled opponents: Effects on presence, flow, and enjoyment. *Computers in Human Behavior*, 24(5), 2274-2291.
- Wiedemann, R. (1974). *Simulation des Strassenverkehrsflusses*. Karlsruhe: Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe.
- Will, S. (2011). *Vergleich von Einzel- und Pulksimulation unter Berücksichtigung verschiedener Abstandsinstruktionen beim Folgefahren*. Unveröffentlichter Praktikumsbericht zur Verkehrspsychologischen Forschung, Universität Würzburg.
- Williams, R. B., & Clippinger, C. A. (2002). Aggression, competition and computer games: computer and human opponents. *Computers in Human Behavior*, 18(5), 495-506.
- Willumeit, H.-P., & Jürgensohn, T. (1997). Fahrermodelle - ein kritischer Überblick. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 99(8), 552-560.
- Yagil, D. (2001). Interpersonal antecedents of drivers' aggression. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 4(2), 119-131.
- Yasar, A.-U.-H., Berbers, Y., & Preuveneers, D. (2008). *A computational analysis of driving variations on distributed multiuser driving simulators*. Vortrag auf der IASTED International Conference on Modelling and Simulation, Quebec.
- Zaidel, D. M. (1992). A modeling perspective on the culture of driving. *Accident Analysis & Prevention*, 24(6), 585-597.
- Zecha, S., & Rasshofer, R. (2009). Forschungsinitiative Ko-FAS: Neue Perspektiven für die Fahrzeugsicherheit. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), 7. *VDI-Tagung "Fahrzeugsicherheit"* (S. 275-289). Berlin: VDI-Verlag.
- Zimmer, J. (2011). *Positionsunterschiede in der Pulksimulation*. Unveröffentlichter Praktikumsbericht zur Verkehrspsychologischen Forschung, Universität Würzburg.

11 ANHANG

Tabelle 16: Übersicht über Abbiegevorgaben für die vier Fahrer des Pulks in der Studie „Evaluierung eines Ampelphasenassistenten“.

Kreuzung Nr.	Fahrer 1	Fahrer 2	Fahrer 3	Fahrer 4
1	geradeaus	rechts	geradeaus	rechts
2	rechts	geradeaus	geradeaus	rechts
3	links	geradeaus	links	geradeaus
4	geradeaus	rechts	rechts	geradeaus
5	geradeaus	rechts	geradeaus	rechts
6	geradeaus	rechts	rechts	geradeaus
7	links	geradeaus	links	geradeaus
8	rechts	geradeaus	rechts	geradeaus
9	rechts	geradeaus	rechts	geradeaus
10	geradeaus	rechts	rechts	geradeaus
11	geradeaus	geradeaus	links	links
12	rechts	geradeaus	geradeaus	rechts
13	rechts	geradeaus	rechts	geradeaus
14	geradeaus	links	geradeaus	links
15	geradeaus	geradeaus	rechts	rechts
16	geradeaus	links	geradeaus	links
17	rechts	rechts	geradeaus	geradeaus
18	links	links	geradeaus	geradeaus

Tabelle 17: Übersicht über Häufigkeiten von Positionen der N = 60 Probanden in der Studie „Evaluierung eines Ampelphasenassistenten“.

Fahrer-ID	HMI	Position			
		1	2	3	4
1	mit	5	8	2	3
2	mit	6	5	4	3
3	mit	11	2	5	-
4	mit	2	4	6	6
5	mit	4	7	5	2
6	mit	9	2	2	5
7	mit	3	3	6	6
8	ohne	2	6	5	5
9	mit	7	5	4	2
10	mit	8	3	5	2
11	ohne	5	7	5	1
12	ohne	2	6	1	9
13	mit	10	2	6	-
14	ohne	5	7	3	3
15	ohne	2	4	3	9
16	ohne	1	5	6	6
17	ohne	5	8	1	4
18	ohne	3	10	2	3
19	ohne	5	3	7	3
20	ohne	11	1	4	2
21	mit	16	1	1	-
22	mit	2	7	4	5
23	mit	1	4	8	5
24	mit	4	7	4	3
25	mit	6	5	5	2
26	mit	7	7	1	3
27	mit	5	7	4	2
28	ohne	6	3	4	5
29	mit	12	1	5	-
30	mit	5	7	5	1

Fortsetzung auf S. 156.

Fortsetzung von S. 155.

Pb-ID	HMI	Position			
		1	2	3	4
31	ohne	1	8	4	5
32	ohne	4	5	1	8
33	mit	4	3	7	4
34	ohne	7	7	3	1
35	ohne	6	6	5	1
36	ohne	1	2	3	12
37	ohne	4	4	6	4
38	ohne	8	6	3	1
39	ohne	10	4	4	-
40	ohne	2	4	5	7
41	mit	5	6	3	4
42	mit	4	8	3	3
43	mit	7	2	7	2
44	mit	2	2	5	9
45	mit	5	6	4	3
46	mit	11	3	3	1
47	mit	7	6	5	-
48	ohne	1	5	4	8
49	mit	8	7	2	1
50	mit	5	4	4	5
51	ohne	2	5	7	4
52	ohne	8	3	4	3
53	mit	3	4	8	3
54	ohne	8	4	4	2
55	ohne	7	2	3	6
56	ohne	3	9	2	4
57	ohne	4	6	6	2
58	ohne	7	5	5	1
59	ohne	7	6	5	-
60	ohne	-	1	2	15

Tabelle 18: Übersicht über Wunschgeschwindigkeiten der Fahrer der Kontrollgruppe in der Studie „Evaluation eines Ampelphasenassistenten“. Da der Fahrer mit der ID 60 niemals an Position 1 fuhr, konnte hier keine Wunschgeschwindigkeit berechnet werden.

Fahrer-ID	HMI	Wunschgeschwindigkeit [km/h]
8	ohne	43.94
11	ohne	51.72
12	ohne	45.95
14	ohne	58.12
15	ohne	50.74
16	ohne	56.48
17	ohne	52.84
18	ohne	57.44
19	ohne	53.78
20	ohne	56.47
28	ohne	51.02
31	ohne	49.92
32	ohne	51.06
34	ohne	53.22
35	ohne	57.58
36	ohne	60.25
37	ohne	49.83
38	ohne	49.65
39	ohne	50.11
40	ohne	49.74
48	ohne	49.63
51	ohne	50.14
52	ohne	52.09
54	ohne	55.14
55	ohne	62.67
56	ohne	59.67
57	ohne	50.39
58	ohne	52.22
59	ohne	59.67
60	ohne	-
Mittelwert		53.15
Standardabweichung		4.45

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbstständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit einschließlich Tabellen und Abbildungen, die anderen Werken im Wortlaut oder sinngemäß entnommen sind, kenntlich gemacht habe; dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat, dass sie noch nicht veröffentlicht worden ist, und dass ich eine Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde.

Die Bestimmungen der Promotionsordnung der Julius-Maximilians Universität Würzburg sind mir bekannt.

Die von mir vorgelegte Dissertation ist von Prof. Dr. Hans-Peter Krüger und Prof. Dr. Mark Vollrath betreut worden.

Würzburg, den 09.September 2013

Dominik Mühlbacher