

Statischer und dynamischer Fahr- simulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 115

bast

Statischer und dynamischer Fahr- simulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit

von

Alexander Frey

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 115

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Fahrsimulatorstudie im Rahmen des Verbundprojekts UR:BAN:
Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich:
Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit.
(Masterarbeit an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf 2014)

Gutachter

Prof. Dr. Axel Buchner (HHU), Dr. Eike A. Schmidt (BAST)

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307

ISBN 978-3-95606-281-0

Bergisch Gladbach November 2016

Kurzfassung – Abstract

Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich: Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit

Die Methodik der experimentellen Fahrsimulation gewährleistet sichere Anwendungsforschung unter hoher Kontrollierbarkeit. Obwohl gegenwärtig viele Forschungsfragen in virtuellen Umgebungen beantwortet werden, existieren weder systematische Validierungsszenarien für Fahrsimulatoren, noch wurde die Vergleichbarkeit der Aussagekraft von Befunden aus Fahrsimulatoren mit und ohne Bewegungssystem bislang angemessen hinterfragt. Daher sollen in der vorliegenden Studie ein statischer und ein dynamischer Fahrsimulator hinsichtlich ihrer Validität in verschiedenen Fahrsituationen verglichen werden, wobei der Schwerpunkt auf Abstands- und Geschwindigkeitswahrnehmung liegt. Es wird erwartet, dass ein zusätzliches Bewegungssystem nur bei Fahraufgaben mit dynamischer Involvierung einen Redundanzgewinn für die Wahrnehmung des Fahrers liefert. Werden hingegen konstante Abstände eingehalten, sollten entsprechend der Hypothese beide Prüfumgebungen äquivalente Resultate zeigen. Insgesamt durchfuhren 60 Probanden Fahrszenarien zur Abstandsherstellung und -einschätzung, teils mit Okklusion, sowie Folgefahrten mit Beschleunigung und Verzögerung. Die Querführung wurde mithilfe einer Gassendurchfahrt untersucht. Indem die virtuelle Umgebung nach Vorbild einer real existierenden Teststrecke konstruiert wurde, kann ebenfalls auf reale Referenzwerte Bezug genommen werden. Die Ergebnisse weisen auf eine vergleichbare relative Validität zwischen statischem und dynamischem Simulator hin, wenn keine Kinetik in der Fahraufgabe vorhanden ist. In Beschleunigungssituationen bewirkt simulierte Fahrdynamik signifikante Wahrnehmungseinbußen, wobei das Bewegungssystem in Bremssituationen die Wahrnehmung signifikant unterstützt. In dem Querführungsszenario ist die Fahrgeschwindigkeit im statischen Simulator zwar signifikant höher und damit näher an der realen Referenz, allerdings wird im statischen Simulator eine auffällig nach rechts versetzte Spur gehalten. Dennoch, so der vorrangige Befund, sollte auch ein statischer Fahrsimulator valide Evaluationen für die meisten Fahraufgaben gewährleisten.

A comparison of fixed-base and moving-base driving simulators: Perception of distance and speed

Driving simulators provide the means to conduct driving research in a safe environment and under controlled conditions. Today, many research questions are being studied using virtual environments. Yet, so far, scenarios to systematically assess a driving simulator's validity do not exist and there is a need for more thorough research on the comparability of results obtained with fixed-base and moving-base driving simulators. Therefore, this study compares a fixed-base and a moving-base driving simulator in terms of their validity for various driving situations focusing on the perception of distance and speed. A moving base is expected to enhance the drivers' perception only in the case of driving tasks involving a dynamic element. For driving tasks with constant distances, the hypothesis is that the results from both test environments will be equivalent. A total of 60 participants completed various driving scenarios that included establishing and estimating distances, partly with occlusion, and accelerating or decelerating while following another vehicle. Lateral control was tested by having participants drive through a narrow passage. With the virtual environment being modeled after a real test course, results from real-life driving tests were also available and could be used as a reference. The obtained results indicate that fixed-base and moving-base driving simulators offer similar relative validity for non-kinetic driving tasks. It was found that the simulation of driving dynamics resulted in reduced perception for acceleration scenarios. For braking scenarios, on the other hand, a moving base significantly enhanced the drivers' perception. In the lateral control scenario, participants drove with significantly higher speeds in the fixed-base simulator, which corresponds to real-life results more closely. However, the drivers' lane position was also markedly offset to the right in these tests. Yet, it was concluded that fixed-base driving simulators will allow for valid evaluations in most driving tasks.

Inhalt

Danksagung	6	2.2.5	Simulationsszenarien	23
1 Einführung	7	2.2.5.1	Abstand herstellen	23
1.1 Fahrsimulation	7	2.2.5.2	Abstand schätzen	24
1.1.1 Simulatortypen	8	2.2.5.3	Okklusionsversuch	25
1.1.2 Fahrsimulation in der Anwen- dungsforschung	9	2.2.5.4	Folgefahrt mit Beschleunigung oder Verzögerung	25
1.2 Wahrnehmung in der Realität und Simulation	10	2.2.5.5	Gassendurchfahrt	27
1.2.1 Optischer Fluss und binokulare Disparität	10	2.3	Versuchsdurchführung	27
1.2.2 Monokulare Tiefenkriterien	12	2.4	Datenanalyse und statis- tische Auswertung	28
1.2.3 Okkulometrische Tiefenkriterien	13	3 Ergebnisse	29	
1.2.4 Vestibuläre Wahrnehmung	13	3.1	Abstand herstellen	29
1.3 Simulatorkrankheit	14	3.2	Abstand schätzen	30
1.4 Validität von Fahrsimulatoren	15	3.3	Okklusionsversuch	30
1.4.1 Bisherige Validierungsstudien von Fahrsimulatoren	15	3.4	Folgefahrt mit Beschleunigung	32
1.4.1.1 Fahrgeschwindigkeit	16	3.5	Folgefahrt mit Verzögerung	33
1.4.1.2 Reaktionszeit	16	3.6	Gassendurchfahrt	35
1.4.1.3 Spurposition	17	4 Diskussion	37	
1.4.1.4 Folgefahrten	18	5 Literatur	44	
1.4.2 Einflüsse von Bewegungs- systemen	18	Anhang	49	
1.5 Hypothesen	19			
1.6 Arbeitsteilung	20			
2 Methode	20			
2.1 Stichprobe	20			
2.2 Versuchsmaterial	20			
2.2.1 Statischer Fahrsimulator	20			
2.2.2 Dynamischer Fahrsimulator	21			
2.2.3 Reales und simuliertes Versuchsgelände	21			
2.2.4 Subjektive Bewertungsskala (SBS)	22			

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch Abgleich und Unterstützung von Herrn Dr. Purucker (Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften) möglich, da hierdurch Daten eines dynamischen Fahr-simulators erst zur Verfügung standen. Referenzwerte eines Realfahrzeugs wurden durch Herrn Rüger (Universität der Bundeswehr in München) zur Verfügung gestellt. Zu danken ist auch den Betreuern vorliegender Arbeit, Herrn Prof. Dr. Buchner (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf) und Herrn Dr. Schmidt (BASt). Weiterhin soll Herrn Dr. Schumacher (BASt), Herrn Wandtner (BASt), Frau Müffeler-Römer (BASt) und Frau Genz für die Mitwirkung gedankt werden.

1 Einführung

Fahrsimulation ist gegenwärtig die bedeutsamste Methode, um experimentelle Anwendungsforschung am Automobil zu betreiben. Bevor eine Erprobung im Realfahrzeug stattfindet, werden die meisten neuentwickelten Fahrerassistenzsysteme heutzutage vorab im Simulatorversuch getestet. Auf diese Weise können die Systeme, aber auch das Fahrerverhalten, in einer ungefährlichen und kontrollierbaren Umgebung effizient evaluiert werden, ohne auf Automatisierungsbeschränkungen im Realversuch Rücksicht nehmen zu müssen. Allerdings wirft dieser Ansatz die Frage auf, inwieweit die Ergebnisse solcher Messungen auf reale Gegebenheiten übertragen werden können und ob verschiedene Fahrsimulatoren im selben Experiment vergleichbare Resultate liefern. Welche (Realitäts-)Einbußen müssen beispielsweise in Kauf genommen werden, wenn ein Fahrsimulator ohne zusätzliches Bewegungssystem gewählt wird, anstatt die Studie unter höherem Kostenaufwand in einem hochkomplexen, dynamischen Simulator durchzuführen? Vor allem dieser Frage widmet sich die vorliegende Studie, wobei auch Ausblicke auf generelle Validitätsunterschiede zwischen statischen und dynamischen Fahrsimulatoren in Bezug zur Realität gegeben werden sollen.

Zunächst liegt der Fokus auf der experimentellen Fahrsimulation, indem sowohl die methodischen Vorzüge als auch die Grenzen des Verfahrens beleuchtet werden. In diesem Zuge werden verschiedene Simulator Typen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Realitätsnähe eingeordnet. In Anlehnung an grundlegende Prinzipien der Wahrnehmungspsychologie wird die simulationsrelevante sensorische Information auch vor dem Hintergrund der Simulatorkrankheit erläutert. Schließlich dient ein Überblick über bisherige Forschung im Fahrsimulator zur Generierung der Validitätshypothesen in dieser Studie.

1.1 Fahrsimulation

Unter dem Begriff Fahrsimulator werden verschiedene apparative Aufbauten mit demselben methodischen Ziel zusammengefasst: (Auto-)Fahren in einer virtuellen Umgebung unter kontrollierten Bedingungen. Nach CARSTEN und JAMSON (2011) ist eine präzise Definition jedoch unmöglich, da sich

Fahrsimulatoren in ihrer Konstruktion und ihren experimentellen Möglichkeiten zu stark voneinander unterscheiden. Aktuell ist Fahrsimulation ein beliebtes Werkzeug in Verkehrsforschung und Fahrerverhaltensuntersuchung: CARSTEN und JAMSON (2011) belegen anhand von Publikationszählungen, dass die Fahrsimulation gegenwärtig sogar als das prominenteste Verfahren anzusehen ist. Dabei umfasst die Anwendung sowohl Forschung in den Bereichen Verkehrssicherheit, Fahrerassistenz und Fahrzeugkonstruktion als auch Fahrertrainings (JAMSON, 2011).

Der Entwicklungsstand der Fahrsimulation geht stetig einher mit den technologischen Möglichkeiten seiner Zeit. Ohne die Errungenschaften der Informationsverarbeitung und der visuellen Darstellung in den letzten 60 Jahren wären moderne Simulatoren heute undenkbar. Unabhängig vom Entwicklungszeitpunkt besteht die primäre Bestrebung darin, die Realität so detailgetreu wie irgend möglich abzubilden. HUTCHINSON (1958) berichtet von einer frühen Form von Fahrsimulation, der eine Filmprojektion zugrunde lag. Dabei lenkte der Fahrer das eigene Fahrzeug im Vordergrund, im Hintergrund wurde ein Filmausschnitt aus dem Straßenverkehr präsentiert. Selbstverständlich konnte der Fahrer auf diese Weise nicht mit der Simulation interagieren, um beispielsweise seine Fahrgeschwindigkeit eigenständig zu regulieren.

In den nachfolgenden Jahrzehnten beherrschte analoge Elektronik, die auf physikalischen Modellen beruhte, den Standard der Fahrsimulation. Für die visuelle Darstellung fand eine sehr vereinfachte Vektorgrafik auf Basis der Oszillografie Anwendung (ALLEN & McRUER, 1977). Erst durch Etablierung des Personal Computers (PC) konnte eine Weiterentwicklung aufgrund höherer Rechenleistung erfolgen. In Kombination mit digitaler Technik und leistungsfähigen Grafikkarten wurden Darstellungen in Echtzeit möglich (WEBBER, PHILLIPS & BADLER, 1993). ALLEN, ROSENTHAL und COOK (2011) heben hervor, dass aufgrund hochauflösender Beamer- und LCD-Technologie selbst feine Texturdetails wie Straßenschilder in größerer Distanz oder Straßenbelag adäquat simuliert werden konnten. Unter diesen Voraussetzungen sollte die fortschreitende Optimierung der Simulation mit einer Erhöhung der Validität in Bezug auf die Realitätsnähe einhergehen. Nach GREEN (2007) sind diese Entwicklungsbestrebungen bei weitem nicht abgeschlossen.

1.1.1 Simulator Typen

Gegenwärtig existiert eine große Vielzahl an Fahr-simulatoren, die sich in einem breiten Merkmalspektrum voneinander unterscheiden. Obwohl alle Anlagen das Ziel verfolgen, eine für den Fahrer virtuelle Realität zu konstruieren, differieren vor allem die technischen Merkmale, die maßgeblich die Güte der Simulation und deren Anwendungsbereich bestimmen. WEIR und CLARK (1995) unterteilen Fahr-simulatoren in drei Typen: Simulatoren des unteren Levels (Typ I), des mittleren Levels (Typ II) und des hohen Levels (Typ III).

Typ-I-Simulatoren bestehen meist aus einem einzigen leistungsstarken Rechner, in dem eine Grafikkarte durchschnittlicher Leistung verbaut ist. Das Bild wird über einen solitären LCD-Monitor dargestellt. Vor dem Monitor befindet sich eine Lenkrad-Konsole, die mittels eines variablen Lenkmomentwiderstands eine haptische Rückmeldung an den Fahrer überträgt. Die Geschwindigkeitseinstellung erfolgt über eine Pedalerie (Gas- und Bremspedal) auf dem Fußboden. Insgesamt kann der Typ-I-Simulator lediglich ein geringes Maß an Kinästhetik vermitteln und besitzt ein sehr nahes und eingeschränktes horizontales Sichtfeld (JAMSON, 2011). Der Vorteil dieses Aufbaus besteht sowohl in einem sehr geringen Kostenaufwand (Material und Wartungskosten) als auch in einer variablen und äußerst platzsparenden Einsatzmöglichkeit in Laboren.

In Typ-II-Simulatoren wird die Rechenleistung mehrerer PC in Kombination mit Hochleistungsgrafikkarten genutzt. Somit kann die visuelle Darstellung (meist mithilfe von Projektoren) über eine breite Leinwand erfolgen, die das gesamte Sichtfeld des Fahrers abdeckt. Entweder wird hierbei die Leinwand aus mehreren einzelnen Projektionsflächen zusammengesetzt, oder es wird eine einteilige sphärische Leinwand verwendet. Der Fahrer selbst sitzt in einer nachgebildeten Fahrzeugkabine, einem sogenannten Mock-Up, oder einer serienfertigen Fahrzeugkabine. Die Kabine ist hierbei üblicherweise vollständig instrumentiert. Bei Typ-II-Simulatoren muss zwischen einem statischen- und einem dynamischen Fahr-simulator unterschieden werden, wobei ein dynamischer Simulator zusätzlich über ein Bewegungssystem verfügt. In vielen Fällen wird konstruktionsbedingt eine Stewart-Plattform (Hexapod) verwendet, die auf einer kleinen Aufstellfläche Bewegungen mit sechs Freiheitsgraden (Translation: horizontal, vertikal und lateral;

Rotation: drehen, neigen und gieren) zulässt (STEWART, 1965). Ursprünglich wurde die Plattform als Basis für Flugsimulatoren entwickelt, da sie hohe Beschleunigungen und schnelle Richtungsänderungen simulieren kann. In Fahr-simulatoren müssen jedoch häufig langsame Beschleunigungsintensitäten über einen langen Zeitraum simuliert werden. Hierbei stößt die Stewart-Plattform an ihre Grenzen. Beispiele für Typ-II-Simulatoren sind unter anderem der statische Fahr-simulator der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in Bergisch Gladbach sowie der dynamische Fahr-simulator des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW).

Typ-III-Simulatoren sind grundsätzlich dynamischer Bauart. Ihr Bewegungssystem besteht meist aus einer Stewart-Plattform, die auf einem Schienensystem befestigt ist. Auf diese Weise kann die Plattform auf einer Längs- und/oder Querschienen (mit jeweils ca. 15 m Länge) auch über einen längeren Zeitraum beschleunigt bzw. abgebremst werden. Im Gegensatz zu Typ-II-Simulatoren ist bei Typ-III-Fahr-simulatoren auf der Stewart-Plattform eine Kuppel aufgesetzt, die ein vollständiges, serienfertiges Fahrzeug beherbergt. In einigen Simulatoren dieser Art kann der Fahrzeugtyp beliebig ausgetauscht werden. Die Projektion der Simulation erfolgt auf einer 360°-Leinwand, die rundum in der Kuppel verbaut ist. Insgesamt ist dieser Aufbau mit hohen Anschaffungs- und Betriebskosten sowie einem großen Platzbedarf in einer Versuchshalle verbunden. Dieser Simulator Typ beansprucht jedoch, aufgrund der aufwendigen Simulationstechnik, das valideste Abbild der Realität zu gewährleisten. Beispiele für Typ-III-Simulatoren sind unter anderem der US-amerikanische „National Advanced Driving Simulator“ in Iowa oder in Deutschland der Daimler-Fahr-simulator in Sindelfingen (KAPTEIN, THEEUWES & van der HORST, 1996).

CARSTEN und JAMSON (2011) geben allerdings zu bedenken, dass eine wie die oben beschriebene Simulator-Klassifikation unter Umständen arbiträr erscheint. Schließlich können Merkmale von Typ-II-Fahr-simulatoren durchaus in Typ-I-Aufbauten integriert werden und umgekehrt. Letztendlich soll dieser Klassifikationsansatz helfen, Fahr-simulatoren bezogen auf den technischen Simulationsaufwand und die finanziellen Ausgaben (Anschaffungs- und Betriebskosten) einzuordnen.

1.1.2 Fahrsimulation in der Anwendungsforschung

Ziel von Anwendungsforschung ist es, experimentell gewonnene Erkenntnisse mit möglichst hoher ökologischer Validität zu betrachten. Neben Grundlagenforschung unter standardisierten Laborbedingungen (hohe interne Validität) sowie Feldforschung mit zahlreichen konfundierenden und nicht kontrollierbaren Variablen unter realen Gegebenheiten (hohe externe Validität) ist Anwendungsforschung in ihrer Methodik zwischen beiden Extrema einzuordnen. Der Ansatz verfolgt also die Übertragbarkeit experimenteller Beobachtungen (unter kontrollierten Bedingungen) auf die Realität. Die Methodik der Simulation ist ein prominenter Vertreter der Anwendungsforschung, vor allem für automobiler Fragestellungen.

Fahrsimulation kommt immer dann zum Einsatz, wenn eine Studie nicht unter realen Bedingungen im Straßenverkehr durchgeführt werden kann. Probleme dieser Art treten insbesondere dann auf, wenn ethische Richtlinien experimentell nicht eingehalten werden können (BELLA, 2008; JAMSON, 2011). Unter Umständen könnte der Versuchsablauf andere Verkehrsteilnehmer oder die Probanden selbst unkontrollierbaren Gefahren aussetzen. Immer dann, wenn Verhalten in kritischen Verkehrssituationen (z. B. Ausweichen vor Hindernissen, Gefahrenbremsungen oder Ablenkung durch Nebenaufgaben) untersucht wird, darf ein Versuch nicht im realen Straßenverkehr stattfinden. Selbst auf Teststrecken, einer Vorstufe zur Realfahrt, könnte das Gefährdungsrisiko von Probanden womöglich zu hoch sein. Umso erfreulicher ist es zu bewerten, dass die Fahrsimulation eine Lösungsalternative für solche Fragestellungen anbietet.

Ein weiterer Vorteil moderner Fahrsimulation liegt in der experimentellen Kontrollier- und Wiederholbarkeit des Versuchsablaufs (GODLEY, TRIGGS & FILDES, 2002). Selbst wenn im realen Straßenverkehr eine festgelegte Route wiederholt gefahren wird, erlebt der Proband niemals ein und dieselbe Situation ein zweites Mal in der gleichen Weise. In der Feldforschung werden diese zufälligen Ereignisse als notwendig erachtet, um Annahmen über menschliches Verhalten im Straßenverkehr valide überprüfen zu können. Unter strengen testtheoretischen Überlegungen ist es jedoch schwierig, Aussagen über die Validität einer Messung zu treffen, wenn selbst Reliabilitätskriterien nur unzulänglich erfüllt sind. Auch hier schlägt die Fahrsimulation

eine Brücke zwischen experimenteller Kontrolle und Anwendung in der (virtuellen) Realität. So kann auch im zehnten Versuchsdurchgang die Reaktion des Probanden auf einen Vorfahrt nehmenden Verkehrsteilnehmer an einer vordefinierten Kreuzung unter denselben Bedingungen wie im ersten Durchgang untersucht werden.

Nicht zuletzt gewährt die Fahrsimulation Forschung unter Einsatz von überschaubaren monetären Kosten (zumindest in Typ-I- und Typ-II-Simulatoren). Viele Fragestellungen könnten gar nicht oder nur mit hohen Auflagen angegangen werden, wenn die jeweilige Studie im realen Straßenverkehr stattfinden müsste. CARSTEN und JAMSON (2011) sprechen gar von aufstrebender verkehrspsychologischer Forschung im Zuge fortschreitender Simulationstechnik. Auf diese Weise kann Forschung im (virtuellen) Straßenverkehr erschwinglich werden. Vor dem oben beschriebenen Hintergrund besitzt Fahrsimulation folglich eine effiziente Universalität: Mit hoher Ökonomie kann eine große Variablen- und Datenmenge in kürzester Zeit gesammelt werden, indem entsprechend die virtuelle Umgebung erschaffen wird, die für den jeweiligen Versuch benötigt wird.

Obwohl die moderne Fahrsimulation vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bietet, sollten auch die Grenzen und Probleme des Verfahrens beachtet werden. Der thematische Schwerpunkt liegt dabei auf der Frage, wie realitätsnah die Simulation überhaupt sein kann. Können Befunde aus Simulatorstudien als valide angesehen werden? Ein Überblick hierzu soll in Kapitel 1.4 gegeben werden. Weitere methodische Einschränkungen in der Simulation könnten sich durch die Tatsache ergeben, dass dem Fahrer im Simulator bewusst ist, lediglich eine Simulation zu durchfahren, anstatt sich im realen Straßenverkehr zu bewegen. JAMSON (2011) gibt daraus resultierende motivationale Einbußen zu bedenken. Schließlich hat Fehlverhalten in der Simulation keine lebensgefährlichen Konsequenzen zur Folge, wie es in der Realität der Fall wäre.

Üblicherweise fahren Personen zu Lehr- oder Forschungszwecken regelmäßig in ein und demselben Simulator. Auf diese Weise trainieren sie ihre Fertigkeiten und die Wahrnehmung in der entsprechenden Prüfumgebung. Hinsichtlich der Simulatorkrankheit kann dies unter Umständen von Vorteil sein, siehe Kapitel 1.3. Probleme treten jedoch dann auf, wenn die Leistung und das Erleben der

Personen im Simulator bewertet wird. Nach WICKENS und HOLLANDS (2000) können dann Verzerrungen durch Übung auftreten, sobald Personen eine Passung zu einer bestimmten Prüfumgebung entwickelt haben. Umso kritischer ist folglich die Methodik von Studien anzusehen, die ein und dieselben Probanden in verschiedenen Simulatoren testen.

1.2 Wahrnehmung in der Realität und Simulation

Im folgenden Kapitel sollen die Prinzipien menschlicher Wahrnehmung erläutert werden, die auch in der simulierten Fahrumgebung den größten Informationsanteil besitzen. KEMENY und PANERAI (2003) schlagen vor, die Sinnesmodalitäten hierfür hierarchisch nach ihrem Nutzen zu ordnen: Demnach bildet die visuelle Wahrnehmung den Schwerpunkt, da sowohl reales als auch simuliertes Autofahren primär als eine visuelle Aufgabe zu charakterisieren ist (ANDERSEN, 2011). Anschließend sollen zentrale Aspekte des vestibulären Systems erläutert werden, da (zumindest in der Realität) jederzeit Bewegungsänderungen des Fahrzeugs auf den Fahrer einwirken. Zuletzt leistet auch das auditorische System einen wichtigen Informationsbeitrag zur Wahrnehmung der Fahrzeugumgebung sowie des Fahrzeugzustands. Beispielsweise wird der ausgesendete Schalldruck von Verkehrsteilnehmern in unmittelbarer Nähe des Fahrers größer als in weiter Entfernung wahrgenommen. Da in der vorliegenden Studie akustische Manipulation keine direkte Rolle spielte bzw. Fahrzeuggeräusche zwischen den Versuchsbedingungen konstant gehalten wurden, wird auch im Folgenden auf nähere Erklärungen zur auditorischen Wahrnehmung verzichtet.

Der Fahrer besitzt die Aufgabe, das Fahrzeug anhand der ihm zugänglichen Informationen zu steuern und zu kontrollieren. WICKENS, LEE, LIU und GORDON BECKER (2004) beschreiben den Kontrollvorgang in einem Regelkreis: Der sensorische Input wird vom Menschen (Fahrer) wahrgenommen, worauf eine Anpassung der Stellgrößen (z. B. Geschwindigkeit oder Fahrtrichtung) erfolgt, falls der Ist-Zustand nicht mit dem Soll-Zustand übereinstimmt. Der Eingriff in das System (Fahrzeug) wird beendet, sobald der gewünschte Zustand erreicht wurde. Letztendlich stehen dem Fahrer eine Vielzahl sensorischer Informationen zur Verfügung, die es ihm ermöglichen, die Situation zu analysieren

und eine Zustandsveränderung herbeizuführen. Dabei orientiert sich der Fahrer aber weitestgehend an Abstands- und Geschwindigkeitsinformation (JAMSON, 2011). Daher sollen im Folgenden die visuellen Prinzipien der Bewegungs- und Tiefenwahrnehmung in aufsteigender Reihenfolge ihrer Wichtigkeit, bzw. ihres Informationsbeitrags in virtuellen Umgebungen näher erörtert werden.

1.2.1 Optischer Fluss und binokulare Disparität

Ein mächtiger visueller Hinweis auf Bewegung ist der optische Fluss. Bereits GIBSON (1958) beschreibt dieses Phänomen als grundlegend für Raumorientierung und Eigenbewegungswahrnehmung. Bewegt sich eine Person im Raum auf ein ruhendes, fixiertes Objekt (Fluchtpunkt) zu, so hat sie visuell den Eindruck, dass sich ruhende periphere Objekte an ihr vorbei bewegen. Dieser optische Fluss ist umso größer, je weiter der Betrachter vom fixierten Objekt entfernt ist. WARREN und HANNON (1990) haben das Prinzip unterschiedlicher Flussgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Objekt- bzw. Fluchtpunktentfernung durch Raumvektoren verdeutlicht (Bild 1). Es wurde festgestellt, dass Menschen sensibel auf eine Änderung der Flussgeschwindigkeit reagieren, woraus FESTL (2011) eine Wahrnehmung der Eigenbeschleunigung ableitet.

Generell ist festzustellen, dass es in virtuellen Umgebungen im Vergleich zur Realität zu einer deutlichen Reduktion von visuellen Hinweisreizen kommt (ESPIÉ, GAURIAT & DURAZ, 2005; KEMENY & PANERAI, 2003). Primär ist davon Disparitätsinformation betroffen, die jedoch neben dem optischen Fluss einen wesentlichen Beitrag zur Tiefen- und Abstandswahrnehmung im Raum liefert (WOLFE et al., 2009). Vor allem ist dieser Verlust der zweidimensionalen Projektion geschuldet, die weder Bewegungsparallaxe, noch binokulare Disparität (Stereopsis) zulässt. Hierfür wäre es notwendig, dass die geometrische Information von zwei Objekten aus unterschiedlichen Positionen bzw. unterschiedlichen Winkeln das linke und rechte Auge erreicht (ROGERS & COLLETT, 1989). Effekte von binokularer Disparität sind in einem Abstand von bis zu 100 m zwischen Betrachter und Objekt auszumachen (ANDERSEN, 2011; LOOMIS & KNAPP, 2003). Je geringer der Abstand zwischen Betrachter und Objekt, desto größer ist der Informationsbeitrag für die Tiefenwahrnehmung. JAMSON

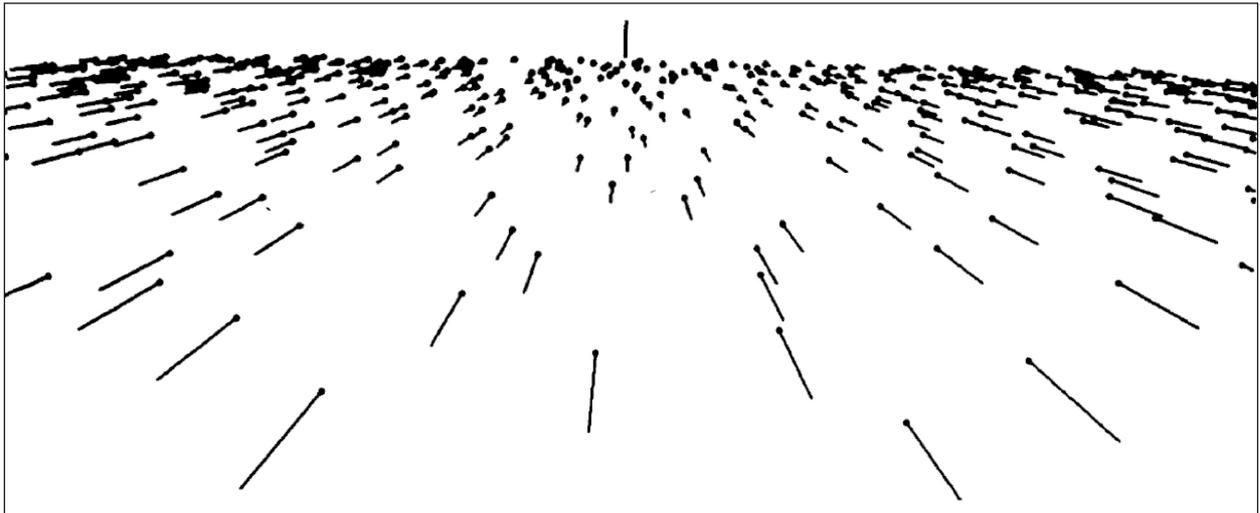


Bild 1: Schematische Darstellung des optischen Flusses bei Bewegung entlang einer Ebene in Richtung des Fluchtpunkts (vertikale Linie), aus WARREN und HANNON (1990)

(2011) diskutiert, dass beim Autofahren in Realität und Simulation, ausschließlich Objekte in über 30 m Entfernung für den Fahrer Relevanz besitzen, und somit der Informationsanteil durch Disparität im Fahrsimulator sehr gering, und folglich zu vernachlässigen wäre. Dennoch ist unter Verwendung von Stereodisplays, die jedoch nur in den seltensten Fällen in Simulatoren verbaut sind, mit einem zusätzlichen Gewinn an Tiefeninformation zu rechnen, da die Projektionsfläche eines Simulators meist in einem Abstand von unter 3 m vom Auge des Fahrers entfernt positioniert ist. Für nah simulierte Objekte in dreidimensionaler Darstellung könnte Disparität dementsprechend effiziente Tiefenwahrnehmung gewährleisten (CUTTING & VISHTON, 1995).

Analog zur binokularen Disparität wirkt der Einfluss von Bewegungsparallaxe stärker bei geringen Distanzen als bei weiten Distanzen. Dem Phänomen liegt zugrunde, dass die Bewegung von weit entfernten Objekten dem Betrachter geringer erscheint als die Bewegung von nahen Objekten (GOLDSTEIN, 2002). In der Realität kann auf diese Weise effizient Tiefeninformation generiert werden, die in Fahrsimulatoren oft nur ansatzweise (zweidimensional) nachgebildet werden kann, indem die Bewegungsgeschwindigkeit von weit entfernt simulierten Objekten, relativ zu nahen Objekten, reduziert dargestellt wird. Insofern sind die Wahrnehmungseinbußen aufgrund von fehlender Stereoprojektion, vor allem die Bewegungsparallaxe betreffend, nach PANERAI et al. (2001) als eine gravierende Einschränkung für Abstandseinschätzung im Fahrsimulator zu beurteilen.

Die Wahrnehmung von optischem Fluss bedarf jedoch nicht notwendigerweise einer dreidimensionalen Darstellung (WARREN & HANNON, 1990) und kann somit auch in simulierten Umgebungen zuverlässig Bewegungs- und Distanzinformation liefern, wenn in der Simulation eine akkurate Eigenbewegungswahrnehmung sichergestellt ist (WANN und LAND, 2000, zit. nach JAMSON, 2011).

Speziell in Untersuchungen mit Folgefahrt-Szenarien (siehe Kapitel 1.4.1.4) dient optischer Fluss als salientester Hinweisreiz, um die Eigenbewegung relativ zur Fremdbewegung abzubilden (BREMNER & LAPPE, 1999). Eine Sonderform der Abstandsherstellung nehmen Szenarien ein, die beispielsweise Auffahrunfälle untersuchen, sogenannte Kollisionsszenarien. Im Unterschied zu Folgefahrten ändert sich hierbei die periphere Fließgeschwindigkeit, indem sie umso größer wird, je näher der Mensch (oder Fahrer) dem Objekt (ein fremdes Fahrzeug) kommt. Laurent und GABBIANI (1998) konnten zeigen, dass optischer Fluss essentiell für das menschliche Kollisionsvermeidungssystem ist. Dennoch kann optischer Fluss lediglich als notwendiger, nicht aber als hinreichender visueller Hinweisreiz in simulierten Umgebungen verstanden werden. Obwohl optischer Fluss in der Lage ist, einen relativen Geschwindigkeits- oder Abstandsbezug zu einem Objekt oder anderen Fahrzeug herzustellen, befähigt er alleine nicht zur absoluten Geschwindigkeits- oder Abstandseinschätzung (LEE, 1976).

1.2.2 Monokulare Tiefenkriterien

Neben Disparitätseinschränkungen birgt Simulation im Gegensatz zur Realität auch Einbußen in räumlicher und zeitlicher Auflösung (Bildfrequenz) sowie der verfügbaren Texturinformation (JAMSON, 2011). Eine unmittelbare Folge ist beispielsweise, dass Geschwindigkeiten in simulierten Umgebungen stark unterschätzt werden (PLUMERT, KEARNEY, CREMER & RECKER, 2005).

Zunächst stellt sich die Frage, inwieweit die üblicherweise verwendeten Projektionstechniken der menschlichen räumlichen Auflösung gerecht werden. Eine Beispielrechnung für die Horizontale eines Typ-II-Simulators soll einen Anhaltspunkt schaffen: Angenommen, der Projektor besäße eine horizontale Auflösung von 1.400 Pixel, die auf einer Leinwandbreite von 2,8 m abgebildet würde. Befände sich nun das Auge des Fahrers in einem Abstand von 2,5 m zur Leinwand, würde ein Sehwinkel von ca. $58,5^\circ$ aufgespannt. Daraus ergäben sich ungefähr 24 Pixel pro Grad Sehwinkel, was wiederum einer Auflösung von 2,5 Bogenminuten pro Pixel entspräche. Nach FREDERICKSEN, VERSTRATEN und van de GRIND (1993) liegt die maximal mögliche räumliche Auflösung des menschlichen visuellen Systems sogar bei 1,0 Bogenminuten pro Pixel. Dementsprechend wird in den meisten Simulationsaufbauten die räumliche Auflösung des Menschen nicht vollständig ausgeschöpft – die Auflösung der virtuellen Umgebung ist häufig zu gering und nicht realitätsgerecht.

In der realen Welt bestimmen auch Hinweise über die Oberflächenbeschaffenheit von Objekten die menschliche Wahrnehmung. Hierbei ist von sogenannter Texturinformation die Rede. Dieser visuelle Beitrag ist nicht nur ausschlaggebend für Objekterkennung, sondern liefert ebenfalls einen entscheidenden Beitrag zu Abstandswahrnehmung (ANDERSEN, BRAUNSTEIN & SAIDPOUR, 1998). In der Realität existiert Textur in vielen Ebenen, von denen lediglich ein Bruchteil in virtuellen Umgebungen widergespiegelt wird (LARISH & FLACH, 1990). Einerseits liegt die Ursache dafür in sparsamer Szenariengestaltung hinsichtlich des Detaillierungsgrades, andererseits sind auch durch die physikalische Auflösung der Projektion Grenzen für die Texturinformation gesetzt. Vor dem Hintergrund der Resultate von MANSER und HANCOCK (2007) sowie NGUYEN-TRI und FAUBERT (2007) sollte auch zu bedenken sein, dass Textur maßgeblich die Wahrnehmung der Eigengeschwindigkeit beein-

flusst. Demnach wird die Eigengeschwindigkeit höher eingeschätzt, wenn die Texturdichte größer ist (NGUYEN-TRI & FAUBERT, 2007). Dieses Phänomen kann unmittelbar auf Geschwindigkeitssenkungen im Straßenverkehr angewandt werden (BRINDLE, 1992), indem die Texturdichte gezielt erhöht wird (z. B. mithilfe von Bepflanzungen oder farbig abgesetzten Lärmschutzwänden). In der simulierten Umgebung jedoch besteht die Gefahr, dass der Fahrer, wie oben beschrieben, Geschwindigkeiten unterschätzt, weil die Texturdichte zu gering ist.

Eine weitere Erklärung für Geschwindigkeitsunterschätzungen in virtuellen Umgebungen ist in der zeitlichen Auflösung der Projektion zu finden. Selbst bei modernen Fahrsimulatoren ist die Bildwiederholfrequenz mit durchschnittlich 60 Hz als zu niedrig zu bewerten (ANDERSEN, 2011; SANTOS, MERAT, MOUTA, BROOKHUIS & de WAARD, 2005), wodurch Einbußen in der Darstellungspräzision entstehen. Die Folge ist eine Abnahme der Ausdehnungsrate des Bildes, wodurch die optische Flussgeschwindigkeit reduziert sein kann – die Fahrgeschwindigkeit wird unterschätzt.

Positiv sind Typ-II- und -III-Simulatoren hinsichtlich ihres Sichtfeldes zu beurteilen. 180° - bzw. 360° -Projektionen gewährleisten eine ausreichende Darstellungsbreite, damit optischer Fluss wirken kann. Letztendlich bestimmt die Breite der Projektionsfläche, ob auch periphere Areale des menschlichen Sichtfeldes involviert werden: Da sich mit zunehmender Reizexzentrizität eine erhöhte Dichte bewegungssensitiver Zellen im visuellen Feld findet (MCKEE & NAKAYAMA, 1984), ist vor allem peripheres Sehen wichtig, um Bewegung in der Realität, aber auch in der Simulation wahrnehmen zu können.

Unbeeinträchtigt von der Wahrnehmungsreduktion in virtuellen Umgebungen sollten Tiefenhinweise der Okklusion sowie der relativen Größe und der relativen Höhe im visuellen Feld sein. Voraussetzung hierfür ist, dass Objekt-Verdeckungen grafisch dargestellt werden und die Projektionsgröße und -höhe von Objekten in vordefinierten Abständen der realen Objektgröße und -höhe entspricht. Eine hilfreiche Methodik zur Auswertung dieser Kalibrierungswerte findet sich bei STAM (2013). Auswirkungen der relativen Höhe im Blickfeld von Fahrern auf Abstands- und Kollisionszeiteinschätzungen zeigt beispielsweise das Simulationsexperiment von BUCHNER, BRANDT, BELL & WEISE (2006).

Es wurde festgestellt, dass eine hohe und enge Anordnung von Bremslichtern einen größeren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug (im Nebel) suggeriert als bei tiefen und breit positionierten Bremslichtern.

Nebel selbst, bzw. die Sättigung von Luft durch Wassertröpfchen oder Staubpartikel bedingt, dass Objekte in unmittelbarer Nähe des Betrachters detailliert, in großer Entfernung jedoch unscharf wahrgenommen werden. Dieses physikalische Phänomen, die sogenannte Atmosphärische Perspektive, stellt in der realen Umgebung einen wirkungsvollen Hinweis auf Tiefe und Abstand dar (GOLDSTEIN, 2002). Falls die Simulationsgrafik eine entsprechende Unschärferelation weit entfernter Objekte gewährleistet, sollten sich in virtuellen Umgebungen keine Einschränkungen in der Abstandswahrnehmung durch Atmosphärische Perspektive ergeben. Im Übrigen entfaltet Atmosphärische Perspektive den größten Informationsbeitrag für Tiefe erst ab ca. 1.000 m Entfernung vom Betrachter (CUTTING & VISHTON, 1995), die für Fahraufgaben meist eine irrelevante Distanz darstellt (JAMSON, 2011).

1.2.3 Okkulometrische Tiefenkriterien

Die Stellung der Augen sowie ihre aktuelle Linsenform (Akkommodation) lassen Rückschlüsse auf die Abstände von betrachteten Objekten zu, indem indirekt Ansteuerungs- und Rückmeldesignale neuronal ausgewertet werden (GOLDSTEIN, 2002). Wird beispielsweise ein nahes Objekt fixiert, so konvergiert die Augenstellung; bei entfernter Betrachtung ist eine Divergenz zu beobachten. Normalerweise, in realen Umgebungen, spielen okkulometrische Tiefenhinweise für Abstandseinschätzungen während der Autofahrt keine Rolle, da der Wirkungsbereich von Konvergenz bzw. Divergenz und Akkommodation lediglich zwischen einem und zehn Metern liegt (CUTTING & VISHTON, 1995). Im Gegensatz zu einem Autofahrer in der Realität, dessen Blick bis über 100 m weit in die Ferne gerichtet ist, ist dem Fahrer im Simulator durch den Abstand zur Projektionsfläche bei der Sicht in die Ferne eine absolute Grenze gesetzt, die häufig bei ca. 3 m liegt. Unter Verwendung einer zweidimensionalen Darstellung tritt hinsichtlich der Okkulometrie ein eklatantes Problem auf: Nach ANDERSEN (2011) steht die durch Konvergenz und Akkommodation gewonnene Tiefeninformation mit Information aus anderen Tiefenhinweisen im Fahrsimulator in

Konflikt. Als Resultat schildert ANDERSEN (2011), dass Abstände in virtuellen, zweidimensionalen Umgebungen durch Restriktion der Projektionsebene unterschätzt werden. Diese Verzerrung kann ebenfalls bei dreidimensionaler Bild auf treten, sobald diese in einem Abstand von unter zwei Metern vom Auge des Fahrers entfernt dargestellt ist, z. B. mit sogenannten „Head-Mounted Displays“ (ANDERSEN, 2011).

1.2.4 Vestibuläre Wahrnehmung

Autofahren erfordert neben detaillierter visueller Rückmeldung auch Input aus dem vestibulären System, um die Kontrolle und Steuerung des Fahrzeugs zu gewährleisten. In jeder Beschleunigungs- oder Bremsituation sowie in Kurvenfahrten wirken Gravitationskräfte auf den Fahrer ein. Selbst Erschütterungen in Folge von unebenem Straßenbelag können mithilfe der Gleichgewichtsorgane im linken und rechten Innenohr detektiert werden. Rennfahrer, Experten auf dem Gebiet der Fahrzeugwahrnehmung und -beherrschung, berichten nicht selten, dass sie das Verhalten ihres Fahrzeugs „fühlen“ müssen, um gute Leistungen zu erbringen (siehe z. B. LEWERENZ & RÖHRL, 2004). Umso wichtiger ist es, dass Fahrzeugbewegungen auch in Simulatoren adäquat abgebildet werden (vgl. Kapitel 1.4.2). KEMENY und PANERAI (2003) geben einen Überblick über die wichtigsten vestibulären Befunde beim Autofahren: So wurde einerseits beobachtet, dass unzureichende Bewegungsrückmeldung Auswirkung auf die Spurposition sowie auf Geschwindigkeitseinhaltung im Realfahrzeug hat (PAGE & GREY, 1985). Diese Resultate basieren jedoch lediglich auf Einzelfallstudien, die zufallskritisch nicht überprüft wurden. Andererseits ermittelten WIERWILLE, CASALI und REPA (1983) in einem Simulator mit äußerst einfachem Bewegungssystem (keine Stewart-Plattform) bei Deaktivierung des Systems erhöhte Reaktionszeiten, wenn extern herbeigeführter Spurversatz kompensiert werden sollte. Hier ist zu beachten, dass die Probanden mit einer hohen Geschwindigkeit von ca. 100 km/h fahren sollten. GROEN, HOWARD und CHEUNG (1999) unterstützen die Annahme, dass kongruente Bewegungsinformation während der Fahrt einen wichtigen Hinweis auf Eigenbewegung darstellt, indem sie Probanden ihre Eigenbewegung einschätzen ließen, wobei die Bewegung des Simulators kongruent bzw. inkongruent zur erwarteten Fahrzeugbewegung erfolgte.

1.3 Simulatorkrankheit

Im Kontext von Simulator-Validierungen ist es notwendig, auch die Verträglichkeit von Studien in virtuellen Umgebungen zu hinterfragen, da die Durchführung solcher Versuche immer an das Wohlergehen der Teilnehmer geknüpft ist. Der prominenteste Risikofaktor in Simulatorstudien ist sicherlich das akute Auftreten der sogenannten Simulatorkrankheit während und nach simulierten Fahrten. Die Symptome umfassen nach KENNEDY et al. (1987) unter anderem hohen Augendruck, Müdigkeit, Kopfschmerz, erhöhtes Schwitzen, Desorientierung, Schwindel, Blässe, Übelkeit und Erbrechen und können alleine durch visuelle Reize hervorgerufen werden. Dementsprechend sollte zwischen Simulatorkrankheit und sogenannter Bewegungskrankheit unterschieden werden, weil die Symptome selbst in statischen Fahrsimulatoren ohne Bewegungssystem auftreten können (KOLASINSKI, 1995). Dabei ist zu beachten, dass keinesfalls alle Symptome gemeinsam in Erscheinung treten müssen, oder jede Person mit Sicherheit der Simulatorkrankheit unterliegt, wenn sie in einer simulierten Umgebung interagiert.

Das Auftreten der Simulatorkrankheit bringt bei weitem nicht nur physiologische Beschwerden mit sich, sondern beeinflusst ebenfalls die Motivation an Simulatorstudien teilzunehmen, bzw. die Bereitschaft für Trainings. Forschung in (Fahr-)Simulatoren könnte auf diese Weise ein Image-Problem entwickeln. Letztendlich geben STONER, FISHER und MOLLENHAUER (2011) zu bedenken, dass die Simulatorkrankheit auch Auswirkungen auf die Validität sowie die Vergleichbarkeit von Messungen zwischen Simulatoren hat. Schließlich könnte in Simulator A ein geringeres Risiko vorliegen, die Simulatorkrankheit zu entwickeln, als in Simulator B. Generelle Verzerrungen der Messwerte würden beispielsweise dann auftreten, wenn Probanden in Untersuchungen mit Blickerfassung ihre Augen aufgrund von simulatorinduzierter Müdigkeit zu häufig schließen (STONER et al., 2011).

Zur Ätiologie der Simulatorkrankheit existieren verschiedene Theorien, wobei jede für sich genommen das Auftreten nicht vollständig erklären kann. Die bekannteste und weitgehend akzeptierte Erklärung findet sich in der Cue-Conflict-Theorie. Ihren Annahmen zufolge existiert während der Fahrt im Simulator ein intermodaler Konflikt zwischen visuellem und vestibulärem Sinnessystem, hervorgerufen durch technische Begrenzungen des Simulators:

Die Information aus dem visuellen System ist nicht kongruent zur vestibulären Rückmeldung (GRIFFIN, 1990; KOLASINSKI, 1995; REASON, 1978). Die Theorie umfasst ebenfalls, dass mit zunehmender (realer) Fahrerfahrung die Wahrscheinlichkeit steigt, die Simulatorkrankheit auszubilden (GRIFFIN, 1990). Aufgrund der entwickelten Expertise wirkt sich die Erwartungsverletzung zwischen visueller und vestibulärer Wahrnehmung auf diese Weise stärker aus. Unterstützung findet die Cue-Conflict-Theorie darin, dass ein funktionstüchtiges vestibuläres System für das Auftreten der Simulatorkrankheit zwingend erforderlich ist (GRIFFIN, 1990). Dennoch besitzt die Theorie einige Schwächen. Das gravierendste Problem ist die Tatsache, dass sie keine eindeutigen Vorhersagen über ein Vorhandensein oder ein Ausbleiben der Simulatorkrankheit macht (STONER et al., 2011) – folglich bezeichnen STOFFREGEN und RICCIO (1991) die Cue-Conflict-Theorie als nicht falsifizierbar. Person A hat ggf. in Simulator A die Simulatorkrankheit, jedoch nicht in Simulator B. Bei Person B verhält es sich womöglich genau umgekehrt. Auch DRAPER, VIIRRE, FURNESS und GAWRON (2001) konnten experimentell keine validen Vorhersagen über das Auftreten der Simulatorkrankheit mithilfe der Cue-Conflict-Theorie ermitteln, wonach ihnen zufolge die Theorie lediglich eine unvollständige Erklärungsgrundlage bietet. Des Weiteren bemängeln Kritiker, dass Menschen in anderen Umgebungen ebenfalls keine Redundanz von visuellen und vestibulären Reizen erleben, z. B. beim Fernsehgucken (STONER et al., 2011). Entsprechend der Annahmen der Cue-Conflict-Theorie müsste selbst hierbei die Simulatorkrankheit in Erscheinung treten.

Die Theorie der posturalen Instabilität verfolgt den Ansatz, dass das sensorische System bestrebt ist, eine posturale Stabilität (Stabilität der Körperhaltung) in einer Umgebung aufrechtzuerhalten. Diese Austarierung des Bewegungssystems ist beispielsweise für den realen Straßenverkehr gut kalibriert. Wird der Mensch nun in eine neue (virtuelle) Umgebung gebracht, versucht der Organismus mit derselben Kalibrierung die Stabilität in der Simulation herzustellen. Da hier jedoch die entsprechenden Parameter verzerrt sind, kommt es zu einer posturalen Instabilität (KOLASINSKI, 1995). STONER et al. (2011) diskutieren, dass mithilfe der Theorie das stärkere Auftreten der Simulatorkrankheit von Beifahrern im Vergleich zu Fahrern in virtuellen Umgebungen erklärt werden kann, da die Kalibrierung als Beifahrer noch stärker vom realen Fahren ab-

weicht. Darüber hinaus wird die Theorie der posturalen Instabilität von Beobachtungen über erfolgreiches Abtrainieren der Simulatorkrankheit durch viele Übungsfahrten (entspricht einer Neukalibrierung) unterstützt (KOLASINSKI, 1995). Parallelen zur Cue-Conflict-Theorie existieren in dem Sinne, als dass Personen mit ausgeprägter (realer) Fahrerfahrung eher an der Simulatorkrankheit leiden als ungeübte Fahrer (RICCIO & STOFFREGEN, 1991). Generell deuten experimentelle Untersuchungen auf validere Vorhersagen der Simulatorkrankheit durch die Theorie der posturalen Instabilität im Vergleich zur Cue-Conflict-Theorie hin (SMART, STOFFREGEN & BARDY, 2002; STOFFREGEN & SMART, 1998).

Alternative Ätiologie-Erklärungen liefert die Poison-Theorie, indem sie die Simulatorkrankheit aus einer evolutionären Perspektive betrachtet. STONER et al. (2011) erklären, dass allgemein die Wahrnehmung der Umwelt in einer schlechten zeitlichen und räumlichen Auflösung ähnliche Symptome hervorruft, wie dies bei einer Vergiftung der Fall wäre. Der Theorie zufolge ist der Organismus überzeugt, vergiftet worden zu sein, weil durch das Zusammenwirken aller Sinnesmodalitäten ein verzerrter Input vorhanden ist. Obwohl auch die Poison-Theorie das Vorhandensein bzw. Ausbleiben der Simulatorkrankheit nicht präzise voraussagen kann, bietet sie dennoch eine sinnvolle Ergänzung zur Cue-Conflict-Theorie und zur Theorie der posturalen Instabilität an, um konkret Übelkeitsempfinden erklären zu können (STONER et al., 2011).

1.4 Validität von Fahrsimulatoren

Wie präzise bildet ein Fahrsimulator die Realität ab? Welcher Simulator eignet sich am besten für eine konkrete Fragestellung? Sind Untersuchungsergebnisse zwischen zwei oder mehreren Simulatoren vergleichbar? Diese Fragen sollten streng genommen immer geklärt sein, bevor eine Simulatorstudie durchgeführt wird oder Ergebnisse aus verschiedenen Prüfumgebungen miteinander verglichen werden. Leider ist dieses Vorgehen im Zuge experimenteller Fahrsimulationsforschung eher die Ausnahme als die Regel. Häufig wird diese Unsicherheit in Kauf genommen, da für eine Simulator-Validierung keine zeitlichen oder finanziellen Ressourcen zur Verfügung stehen. Gewiss würden die Effizienz und der Sinn einer Simulatorstudie unter zusätzlichen Realfahrtvergleichen leiden. Die Folge ist, dass derjenige Fahrsimulator Verwendung fin-

det, der beispielsweise an einem Forschungsinstitut vorhanden ist, unabhängig davon, ob er sich für die Fragestellung eignet oder nicht. Aus diesem Grund sollten Befunde aus Simulatorstudien immer hinsichtlich ihrer Validität in Bezug zur Realität hinterfragt werden.

CARSTEN und JAMSON (2011) diskutieren, dass ein und derselbe Fahrsimulator in Anwendung A eine hohe Validität haben kann, in Anwendung B jedoch eine sehr geringe. Ausschlaggebend ist also die jeweilige Passung des Simulators auf die Fragestellung. In diesem Zusammenhang ist ein typisches Validitätsparadoxon von Fahrsimulatoren zu nennen: Aufwendige und teure Simulatoren (Typ III) werden meist verwendet, um Messungen mit höchstem Realitätsbezug durchzuführen. Trotzdem findet eine entsprechende Studie nicht im realen Straßenverkehr statt, da eine hohe Kontrollierbarkeit im Versuch sichergestellt werden soll. Nun bedingt jedoch die Komplexität des Typ-III-Simulators, dass ein hoher Varianzanteil in den Messwerten auf unerklärte, konfundierende (Simulator-)Variablen zurückzuführen ist, wodurch die absolute Validität zur Realität sinkt. Genau dies sollte ursprünglich mit großem Kostenaufwand vermieden werden. Letztendlich umfasst Simulator-Validierung also immer auch eine Kosten-Nutzen-Analyse vor dem Hintergrund der jeweiligen Fragestellung.

MULLEN, CHARLTON, DEVLIN und BÉDARD (2011) differenzieren generell zwischen absoluter und relativer Validität eines Fahrsimulators. Unter absoluter Validität, oder auch ökologischer Validität, ist zu verstehen, wie exakt die Resultate aus virtuellen Umgebungen auf die Realität übertragen werden können. Die relative Validität gibt an, ob zwischen Simulation und Realität eine Vergleichbarkeit von Messwerten in derselben Größenordnung und Richtung besteht. Sie würde sich methodisch in Messungenauigkeiten zur Realität um einen konstanten Faktor widerspiegeln.

1.4.1 Bisherige Validierungsstudien von Fahrsimulatoren

Gegenwärtig beschäftigen sich die meisten Veröffentlichungen mit der Frage nach relativer Validität von Fahrsimulatoren. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass Simulation immer nur eine Approximation der Realität darstellt (JAMSON, 2011). Selbst wenn technisch größte Anstrengungen unternommen werden, um visuell höchste Auflösungen zu erzeugen und annähernd perfekte Bewe-

gungen zu imitieren, müssen immer Abstriche im Vergleich zur Realität (absolute Validität) gemacht werden. Umso größer sind die methodischen Schwierigkeiten zu bemessen, die bei Vergleichen verschiedener Fahrsimulatoren auftreten: Da sich jedes Simulations-System grundlegend von einem anderen unterscheidet (vgl. Kapitel 1.1.1), treten unter Umständen eine unbeherrschbare Anzahl konfundierender Variablen in Erscheinung, die eine Herausforderung für Vergleichsmessungen darstellen (JAMSON, 2011).

Bisherige Validierungen von Fahrsimulatoren haben gemeinsam, dass die in Kapitel 1.2 beschriebenen Prinzipien der Wahrnehmungspsychologie im virtuellen Kontext untersucht und meist mit Werten aus realen Umgebungen in Bezug gesetzt wurden. Allerdings existieren hierfür keine standardisierte Vorgehensweise oder klar definierte Variablen, an denen die Validierung festgemacht werden soll. Am häufigsten dienen als abhängige Variablen Geschwindigkeitseinschätzungen, Wahrnehmung auf Geschwindigkeitsveränderungen, Spurpositionen, Reaktionszeiten oder physiologische Parameter, um Vergleichsmessungen durchzuführen (MULLEN et al., 2011). Im Folgenden sollen die Befunde getrennt nach der jeweiligen abhängigen Variable für statische oder dynamische Fahrsimulatoren vorgestellt werden.

1.4.1.1 Fahrgeschwindigkeit

Die Messung der Fahrgeschwindigkeit stellt eine beliebte abhängige Variable im Zuge der Simulatorvalidierung dar, da sich Veränderungen hierbei unmittelbar auf Wahrnehmungsunterschiede (vgl. Kapitel 1.2.1 und 1.2.2) zurückführen lassen. In einem dynamischen Fahrsimulator gingen GODLEY et al. (2002) der Frage nach relativer Validität auf den Grund. Dabei fuhr eine Gruppe Probanden im realen Straßenverkehr, eine andere durchfuhr eine analog gestaltete Route im dynamischen Simulator. Die Fahrgeschwindigkeit wurde in einem Bereich der Route gemessen, die mit Rüttelstreifen ausgestattet war; folglich interessierte die Geschwindigkeitsveränderung aufgrund der Fahrbahnebeneheit. Hinsichtlich der Validität konnten GODLEY et al. (2002) zeigen, dass die Fahrgeschwindigkeit im dynamischen Simulator signifikant höher war als im Realfahrzeug. Dabei nahm die Geschwindigkeit über die gesamte Rüttelstreifendistanz in beiden Prüfumgebungen in derselben Größenordnung ab, woraus die Autoren ebenfalls auf eine akzeptable

relative Validität zwischen dynamischem Simulator und Realfahrzeug schließen. Zu bedenken ist allerdings, dass methodisch von starken Konfundierungen auszugehen ist, da sowohl die Verkehrsdichte als auch Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern im Realversuch nicht kontrolliert wurden. Die Resultate von GODLEY et al. (2002) stützen die Befunde von TÖRNROS (1998) aus einem dynamischen Fahrsimulator, wobei TÖRNROS (1998) den Simulator anhand einer virtuellen Tunneldurchfahrt, verglichen mit einer realen Tunneldurchfahrt, validierte. So konnten signifikant höhere Geschwindigkeiten im simulierten Tunnel als im realen Tunnel ermittelt werden.

BELLA (2005, 2008) hingegen benennt keine signifikanten Fahrgeschwindigkeitsunterschiede zwischen Daten aus einem statischen Fahrsimulator und einer Realfahrt. Auch hierbei fand der Versuch im realen Straßenverkehr statt, wobei auf einer zehn Kilometer langen Landstraße mehrere (externe) Geschwindigkeitsmesspunkte eingerichtet wurden. Die virtuelle Umgebung wurde entsprechend der Landstraßenszenerie konstruiert (BELLA, 2008). Lediglich deskriptiv fanden sich erhöhte Fahrgeschwindigkeiten im statischen Simulator gegenüber dem Realversuch (BELLA, 2008).

Gegensätzliche Ergebnisse berichten KLEE, BAUER, RADWAN und AL-DEEK (1999) aus einem statischen Fahrsimulator. Tendenziell wurden geringere Fahrgeschwindigkeiten im statischen Simulator gemessen als in der Realität. Analog zu den oben beschriebenen Studien, wurde eine virtuelle Szenerie nach Vorlage einer realen Route im Straßenverkehr kreiert. Dennoch könnten diese Befunde durch methodische Unzulänglichkeiten erklärt werden: Indem Probanden zunächst den Realversuch absolvierten und anschließend im statischen Simulator fuhren, könnten die Ergebnisse durch Übungs- und Reihenfolgeeffekte stark verzerrt worden sein.

1.4.1.2 Reaktionszeit

In zwei umfangreichen Studien, die im Speziellen Reaktionszeitmessungen als Validierungsgrundlage für die Simulation verwendeten, bedienten sich sowohl McGEHEE, MAZZAE und BALDWIN (2000) als auch HOFFMAN, LEE, BROWN und McGEHEE (2002) des dynamischen Iowa Driving Simulators (Typ III), um Vergleichsmessungen zu realen Umgebungen durchzuführen. Im ersten Fall

(McGEHEE et al., 2000) wurden Bremsreaktionen auf ein in die Fahrbahn einbiegendes Fahrzeug untersucht. Eine beachtlich große Stichprobe von 192 Probanden absolvierte eine Teststreckenfahrt in Achterform. Eine andere Probandengruppe von 120 Personen fuhr dieselbe, virtuell nachgebaute Strecke im Simulator. Unter kontrollierten Gegebenheiten konnte nun kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Bremsreaktionen zur Verhinderung eines Zusammenstoßes im dynamischen Fahrsimulator und der Teststrecke festgestellt werden. McGEHEE et al. (2000) interpretieren diesen Befund als hinweislich valide Realitätsbild (absolute Validität) des untersuchten Simulators.

HOFFMAN et al. (2002) verwendeten ein alternatives Validierungsszenario, in dem Probanden in einem vordefinierten Abstand eine Folgefahrt hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug absolvierten. Es wurden die Daten von lediglich 16 Teilnehmern aus dem dynamischen Fahrsimulator mit zuvor gesammelten Messwerten von einer Teststrecke verglichen. Dabei zeigten HOFFMAN et al. (2002), dass sich die Reaktionszeiten auf die Verzögerung des Vorderfahrzeugs, unabhängig von der Verzögerungsintensität ($-1,5 \text{ m/s}^2$ oder $-4,0 \text{ m/s}^2$), zwischen Simulation und Realität nicht unterschieden. Wird jedoch die Probandeninstruktion dahingehend verändert, entweder „normal“ oder „hart“ zu bremsen, ist nur bei harter Bremsung eine Vergleichbarkeit von Simulator und Realfahrzeug gegeben. Bei der Instruktion eine „normale“ Verzögerungsintensität zu wählen, bremsten die Probanden im Simulator ähnlich stark ab, wie bei einer „hart“ instruierten Verzögerung. HOFFMAN et al. (2002) machen unter anderem Einschränkungen der Bewegungsnachbildung im dynamischen Simulator für die Wahrnehmungseinbußen der Probanden verantwortlich. Dagegen weisen die Autoren ihrerseits auf Verzerrungen der Messwerte hin, die möglicherweise auf intensives Training der Versuchsteilnehmer auf der Teststrecke zurückzuführen sind.

1.4.1.3 Spurposition

Neben der Längsführung, die üblicherweise durch Geschwindigkeits- bzw. Abstandsmessung ermittelt wird, können Fahrsimulatoren auch hinsichtlich ihrer Querverführung validiert werden. Meistens dient hierfür die laterale Abweichung vom Fahrbahnmittelpunkt, die sogenannte Spurposition. Ein deutlicher Spurversatz im Simulator gegenüber der Realität könnte zur Folge haben, dass die Detek-

tion von Kollisionen (z. B. In Ausweichszenarien) nicht korrekt erfolgt. TÖRNROS (1998) validierte den dynamischen Fahrsimulator nicht nur mithilfe der gemessenen Fahrgeschwindigkeit, sondern auch anhand der Spurposition relativ zur Tunnelwand: Probanden fuhren mit einem signifikant größeren Abstand an einer linken Tunnelwand als an einer rechten Tunnelwand vorbei. Hieraus lässt sich eine nach rechts versetzte Spur schlussfolgern, deren Versatz in der Realität signifikant größer war als im simulierten Tunnel. Allerdings könnten die Resultate aufgrund von Übungseffekten der Probanden sowie einer insgesamt kleinen Stichprobe von $N = 20$ mit Fehlern behaftet sein.

Für eine Validierung ihres statischen Fahrsimulators haben WADE und HAMMOND (1998) zunächst die Spurvariabilität mit Werten aus einer realen Umgebung über Videoanalyse abgeglichen. Ihren Ergebnissen zufolge fuhren Probanden im Simulator mit einer signifikant um ca. 35 cm größeren Spurvariabilität (in Bezug auf den Streckenmittelpunkt) als in der Realität. Einschränkungen der Studie bestehen in einer kleinen Stichprobe ($N = 26$), wobei alle Probanden sowohl in der realen als auch in der virtuellen Umgebung fuhren.

BLANA und GOLIAS (2002) haben mit großem messtechnischem Aufwand ebenfalls in einem statischen Fahrsimulator die Spurposition von 100 Probanden erhoben und mit einer weiteren Gruppe von 100 Probanden im Realversuch verglichen. In der Realfahrt dienten dabei mehrere Kameras dazu, die Spurposition relativ zu Referenzpunkten auszumessen. Insgesamt zeigte die Analyse für eine gerade Strecke, dass ein signifikant größerer Spurversatz im realen Straßenverkehr als im statischen Simulator auftrat, der jedoch mit höherer Geschwindigkeit abnahm, wobei die Richtung des Versatzes (links/rechts) nicht diskutiert wird. Dennoch berichten BLANA und GOLIAS (2002), dass die Streuung der eingehaltenen Spur in der Realität kleiner war als in der Simulation. Trotz umfangreicher Datenerhebung ist bei Interpretation der Ergebnisse zu bedenken, dass eine videobasierte Datenaufzeichnung während der Fahrt im Millimeterbereich bekanntermaßen mit großen Messfehlern verbunden ist. Daher ist es nicht auszuschließen, dass der größere Spurversatz in der Realität lediglich durch große Fehlervarianz des Messinstruments entstanden ist. Im statischen Fahrsimulator hingegen zeichnet die Simulationssoftware den Spurversatz unmittelbar in parametrisierter Form auf, wodurch man hier von einem kleineren

Messfehler ausgehen sollte. Dementsprechend könnte der hier berichtete signifikante Effekt auf unterschiedliche Präzision bei der Datenaufzeichnung, anstatt auf die Prüfumgebung per se zurückzuführen sein.

1.4.1.4 Folgefahrten

Fahraufgaben, in denen Probanden einem vorausfahrenden Fahrzeug folgen sollen, können verwendet werden, um Fahrleistungen in virtuellen, aber auch realen Umgebungen kontrolliert zu quantifizieren. Indem das vorausfahrende Fahrzeug Fahrtrichtung und Geschwindigkeit vorgibt, können beliebige Fragestellungen operationalisiert werden, ohne dass umfangreiche Fahrinstruktionen notwendig wären. Eine sinnvoll zu messende Variable ergibt sich aus der Größe des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug. Dieser kann entweder in Sekunden oder in Metern gemessen werden, wobei einige Autoren Werte in Sekunden, den sogenannten „Time-Headway“ (THW), präferieren (z. B. PURUCKER, RÜGER, SCHNEIDER, NEUKUM & FÄRBER, 2014; YOUNG, REGAN & LEE, 2008), weil der THW ein geschwindigkeitsabhängiges Maß für Sicherheitsabstände darstellt. Obwohl eine Abstandsmessung in Metern äquivalente Ergebnisse zur Sekundenmessung bei bekannter und konstanter Fahrgeschwindigkeit liefert, tragen Meterabstände unter Umständen zu einem besseren Verständnis der Resultate bei, da diese aus der alltäglichen Erfahrung einfacher einzuordnen sind als Zeitabstände. Nicht zuletzt erlauben Folgefahrten, sehr häufige und typische Fahrsituationen aus dem (realen) Straßenverkehr experimentell abzudecken (KONDOH, YAMAMURA, KITAZAKI, KUGE & BOER, 2008).

Im Bereich der Simulatorvalidierung fanden Abstandsmessungen bei Folgefahrt bis zum heutigen Zeitpunkt allerdings nur selten Anwendung (PURUCKER et al., 2014). Vielmehr bedient man sich Folgefahrtszenarien, wenn konkrete Evaluationsfragen hinsichtlich des Fahrerverhaltens in Fahrsituationen (ANDERSEN & SAUER, 2007; MUHRER & VOLLRATH, 2010), oder Ablenkungseffekte durch Nebenaufgaben beantwortet werden sollen (vgl. YOUNG et al., 2008). KONDOH et al. (2008) verwendeten darüber hinaus Folgefahrtaufgaben, um Risikobewertungen von Abständen in einem statischen Fahrsimulator zu erheben. Den Autoren zufolge wiesen die Daten einer kleinen Stichprobe (zehn männliche Personen) eine des-

kriptiv hohe Übereinstimmung mit bereits vorhandenen Realfahrtmessungen (15 Personen) auf.

1.4.2 Einflüsse von Bewegungssystemen

Mit der Integration zusätzlicher Bewegungssysteme in Fahrsimulatoren soll eine realitätsnähere Bild des Autofahrens erreicht werden als ohne Bewegungssystem. Daher beanspruchen dynamische Fahrsimulatoren, üblicherweise eine höhere Validität zu besitzen als statische Simulatoren. Dennoch könnten vor allem unpräzise Bewegungsabläufe des Simulators mit einer Verschlechterung der Realitätsnähe einhergehen. Bei bestimmten Fahraufgaben könnte dann ein statischer Fahrsimulator einem dynamischen Simulator hinsichtlich seiner Validität durchaus überlegen sein. Vor allem ESPIÉ et al. (2005) stehen selbst aufwendigen Bewegungssystemen kritisch gegenüber, da ihnen zufolge das reale Bewegungsverhalten des Fahrzeugs niemals adäquat reproduziert werden könne. Obwohl manche Autoren dynamischen Fahrsimulatoren mitunter eine höhere relative Validität als statischen attestieren (REYMOND, KEMENY, DROULEZ & BERTHOZ, 2001; WIERWILLE et al., 1983), lässt sich die Frage nach der Effektivität eines Bewegungssystems nur eindeutig durch direkte Vergleiche zwischen statischen und dynamischen Fahrsimulatoren klären, indem die Validität des jeweiligen Simulators bezogen auf eine Realfahrtreferenz ermittelt wird.

Wie bereits erwähnt, sind aktuell nur wenige Studien veröffentlicht, die gezielt Simulatoren mit und ohne Bewegungssystem entsprechend ihrer relativen Validität vergleichend untersuchen. Beispielsweise analysierte ALM (1996) die Spureinhaltung in verschiedenen Prüfumgebungen, indem er 17 Probanden eine Simulatorfahrt absolvieren ließ, wobei das Bewegungssystem aktiviert oder deaktiviert wurde. Es zeigte sich, dass bei aktiviertem Bewegungssystem eine signifikant akkuratere Spur gehalten wurde als in der statischen Bedingung. Um Unterschiede in der Fahrgeschwindigkeit und (theoretischen) Querbeschleunigung zu messen, führten REYMOND et al. (2001) eine Studie durch, bei der sieben Probanden eine Strecke mit zunächst aktiviertem Bewegungssystem (dynamisch) und mindestens sechs Stunden später mit deaktiviertem Bewegungssystem (statisch) fuhren. Anschließend wurde anhand des Fahrverhaltens der Teilnehmer und mithilfe von mathematischer Modellierung u. a. auf die theoretisch erfahrene

Querbewegung geschlossen. REYMOND et al. (2001) berichten hierfür keine signifikanten Differenzen zwischen statischer und dynamischer Bedingung. Allerdings erwies sich der Unterschied der mittleren Fahrgeschwindigkeit der Probanden als signifikant. Demnach durchfuhren die Teilnehmer in der dynamischen Bedingung die Strecke schneller als in der statischen Bedingung. Dennoch berichten die Probanden ihrerseits keine alternierende Fahrstrategie zwischen beiden Prüfbedingungen verwendet zu haben. Die Autoren schließen daher, dass Bewegungshinweise nicht bewusst das Fahrverhalten beeinflussen, sondern Wahrnehmungsdifferenzen als vermittelnde Variable ausschlaggebend für alternierendes Fahrverhalten im statischen bzw. dynamischen Simulator sind. Diese Befunde stützt BLANA (2001), zit. nach JAMSON (2011), mit Verweis auf höhere Bremsakkuratesse in dynamischen Fahrsimulatoren, da zusätzliche vestibuläre Bewegungshinweise eine realitätsnähere Geschwindigkeitswahrnehmung während Verzögerungen bedingen.

Sowohl ALM (1996) als auch REYMOND et al. (2001) haben dieselben Probanden (sehr kleine Stichproben) bei aktiviertem und deaktiviertem Bewegungssystem getestet. Folglich können Übungs- oder Reihenfolgeeffekte unter Umständen immens sein, wenn Probanden entweder gewohnt sind in einem statischen, oder in einem dynamischen Simulator zu fahren (vgl. WICKENS & HOLLANDS, 2000; Kapitel 1.1.2).

1.5 Hypothesen

Aufbauend auf den zuvor beschriebenen Befunden sollen in der vorliegenden Studie ein statischer Fahrsimulator und ein dynamischer Fahrsimulator hinsichtlich Geschwindigkeits- und Abstandswahrnehmung verglichen werden. Die zentrale Fragestellung dabei ist, bei welchen Fahraufgaben ein Bewegungssystem die relative Validität erhöht, bzw. ob der Fahrer vom Redundanzgewinn durch zusätzliche Bewegungsnachbildung im Simulator profitiert. Darüber hinaus soll ein Ausblick auf die Realitätsnähe beider Prüfumgebungen anhand von Referenzwerten geben werden.

Die Hypothesen lauten demnach wie folgt:

1. Bei Fahraufgaben, die das Herstellen oder Einschätzen von Abständen umfassen, sollten keine Unterschiede zwischen statischem und

dynamischem Simulator zu beobachten sein, da diese Aufgabentypen keinerlei kinetische Veränderungen beinhalten. Das Herstellen eines subjektiv gefährlichen Abstands zu einem vorausfahrenden Fahrzeug sollte, unabhängig vom jeweils untersuchten Simulator, in einem kleineren Abstand erfolgen als das Herstellen eines subjektiv harmlosen Abstands, weil kleinere (Sicherheits-)Abstände mit einer kritischeren Risikowahrnehmung im (virtuellen) Straßenverkehr einhergehen sollten. Umgekehrt müssten daher auch kleinere Abstände, unabhängig vom jeweils untersuchten Simulator, gefährlicher eingeschätzt werden als große Abstände. Außerdem wird erwartet, dass sich die geschätzte Zeit bis zur Kollision mit einem stehenden Fahrzeug proportional zur realen Zeit bis zur Kollision verhält, unabhängig vom getesteten Simulator, da auch hierbei keinerlei zusätzliche vestibuläre Information während der Fahraufgabe vorhanden ist.

2. Für Beschleunigungs- oder Verzögerungsszenarien wird hinsichtlich der Reaktionszeit und der Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsintensität folgendes erwartet: Die Reaktion auf eine schwache Beschleunigung eines Vorderfahrzeugs sollte langsamer erfolgen als die Reaktion auf eine starke Beschleunigung eines Vorderfahrzeugs, unabhängig vom zu testenden Simulator, da sich die relative Größe eines stark beschleunigenden Vorderfahrzeugs schneller verändert als die relative Größe eines langsam beschleunigenden Vorderfahrzeugs. Hingegen sollten keine Reaktionszeitunterschiede auf schwache oder starke Verzögerungen zu beobachten sein, unabhängig vom zu testenden Simulator, weil die Bremslichter jeweils zu demselben Zeitpunkt aufleuchten (visueller Hinweis) und sich statischer und dynamischer Fahrsimulator nur marginal in ihrer visuellen Darstellung unterscheiden. Für die anschließende Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsintensität der Probanden sollten Unterschiede zwischen statischem und dynamischem Simulator festzustellen sein: Es wird erwartet, dass im statischen Fahrsimulator stärker beschleunigt und verzögert wird als im dynamischen Simulator, da der Mangel an kinetischer Rückmeldung im statischen Fahrsimulator womöglich durch höhere Beschleunigung und stärkere Abbremsung kompensiert werden muss oder Probanden große Auslenkungen des Bewegungs-

systemsim dynamischen Simulator vermeiden möchten. Es wird darüber hinaus von einer größeren Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsintensität der Probanden bei stärkerer Beschleunigung bzw. Verzögerung des Vorderfahrzeugs ausgegangen, unabhängig vom zu testenden Simulator, damit der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug konstant gehalten werden kann.

3. Die Geschwindigkeit bei Einfahrt in eine Leitbarkengasse sollte im dynamischen Simulator größer sein als im statischen Simulator, da zusätzlich nachgebildete Fahrdynamik die Probanden möglicherweise zu höheren Fahrgeschwindigkeiten veranlasst (vgl. Kapitel 1.4.1.1). Unabhängig vom zu testenden Simulator sollte die Geschwindigkeit mit engerer Gassendurchfahrt abnehmen, um die (virtuelle) Berührung der seitlichen Leitbaken zu vermeiden. Hinsichtlich der Spurposition in der Gasse sollte die Spur im dynamischen Simulator akkurater eingehalten werden als im statischen Simulator, da laterale Bewegungsnachbildung die Spurhaltung in Engstellen unterstützen könnte. Die Gassenbreite sollte jedoch in keinem Simulator eine Auswirkung auf die einzuhaltende Spur haben, weil in jeder Prüfumgebung eine zentrierte Gassendurchfahrt erwartet wird.

1.6 Arbeitsteilung

In der vorliegenden Studie wurden Daten eines statischen sowie eines dynamischen Fahrsimulators zufallskritisch verglichen und deskriptiv anhand einer Realfahrt validiert. Dabei umfasste die Arbeitsleistung dieser Studie konkret die Datenerhebung im statischen Fahrsimulator der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) sowie die interferenzstatistische Analyse der Daten beider Simulatoren. Die Daten aus dem dynamischen Fahrsimulator des Interdisziplinären Zentrums für Verkehrswissenschaften (IZVW) der Universität Würzburg und die Referenzwerte der Realfahrt vom Testgelände der Universität der Bundeswehr in München wurden arbeitsteilig im Rahmen des Verbundprojekts UR:BAN erhoben (PURUCKER et al., 2014) und für die weiteren Analyseschritte dieser Arbeit dankenswerterweise zur Verfügung gestellt.

2 Methode

2.1 Stichprobe

Die Stichprobengröße betrug sowohl für den statischen als auch den dynamischen Fahrsimulator $N = 30$ und war hinsichtlich der Geschlechts- und Altersverteilung vergleichbar. Im statischen Fahrsimulator nahmen 15 weibliche Probanden im Alter von 21 bis 46 Jahren ($M = 30$, $SE = 2$) sowie 15 männliche Probanden im Alter von 23 bis 45 Jahren ($M = 30$, $SE = 2$) an der Studie teil. Im dynamischen Fahrsimulator wurden 15 weiblichen Probanden im Alter von 19 bis 50 Jahren ($M = 28$, $SE = 2$) sowie 15 männliche Probanden im Alter von 21 bis 52 Jahren ($M = 29$, $SE = 2$) untersucht. Die Realfahrt absolvierten ebenfalls 15 weibliche Probanden im mittleren Alter von 29 Jahren ($SE = 3$) und 15 männliche Probanden im mittleren Alter von 30 Jahren ($SE = 3$).

Teilnahmevoraussetzung für die Simulatorversuche war neben einer gültigen Fahrerlaubnis auch die Absolvierung eines maximal zweistündigen Fahrsimulatortrainings im entsprechenden Simulator. Ein Beispiel für den Trainingsablauf im statischen Simulator findet sich in Anhang A. Die meisten Probanden durchliefen das Training bereits mehrere Monate vor Versuchsdurchführung, hatten jedoch zwischenzeitlich an weiteren Studien im jeweiligen Simulator teilgenommen. Es wurden gezielt Personen auf die Studie aufmerksam gemacht, die hinsichtlich ihres Alters und ihres Geschlechts die geforderte Zusammensetzung der Stichprobe (ein mittleres Alter von 30 Jahren und eine Gleichverteilung des Geschlechts) gewährleisten konnten. Falls Daten fehlerhaft aufgezeichnet wurden, mussten die entsprechenden Versuchsdurchgänge aus der Auswertung ausgeschlossen werden. Hierdurch reduzierte sich der Stichprobenumfang je nach Versuchsszenario um wenige Probanden.

2.2 Versuchsmaterial

2.2.1 Statischer Fahrsimulator

Als statischer Simulator diente ein Modell der Ergoneers GmbH mit der Software SILAB 4.0 (WIVW GmbH). Die Anlage verfügt über eine vollständig instrumentierte Fahrerkabine (Mock-Up), die vor einer dreiteiligen Leinwand positioniert ist. Dabei beträgt der Abstand zwischen dem Augpunkt des Fahrers und der zentralen Leinwand ungefähr



Bild 2: Statischer Fahrsimulator der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

2,30 m. Die drei Leinwände besitzen die Abmessungen von je 2,80 m × 2,10 m und erlauben eine 180°-Frontsicht. Das Bild wird über drei Beamer (LCD-Technik) mit je einer Auflösung von 1.400 × 1.050 Pixel und einem Lichtstrom von 3.800 ANSI-Lumen projiziert. Als Rück- und Außenspiegel fungieren LCD-Displays. In Bild 2 ist der statische Fahrsimulator im Versuchsraum dargestellt.

Simuliert wird als sogenanntes EGO-Fahrzeug ein BMW 520i, Baureihe E39 mit Automatikgetriebe. Die Fahrgeräusche des EGO-Fahrzeugs können in Abhängigkeit von Drehzahl, Last, Wind- und Abrollgeräuschen sowie der Fahrgeschwindigkeit dargestellt werden. Hierzu dient ein 5.1 Lautsprechersystem. Fahrzeugtypische Vibrationen erzeugt ein Bass-Shaker unterhalb des Fahrersitzes. Die gesamte Simulationsanlage wird über elf Rechner mit je einem 3,4 GHz-Prozessor, 3,5 GB Ram Arbeitsspeicher und einer Nvidia GeForce GTX 470 Grafikkarte in einem 1.000-Mbit-Netzwerk betrieben.

2.2.2 Dynamischer Fahrsimulator

Als dynamischer Simulator fand der Fahrsimulator mit Bewegungssystem der WIVW GmbH in Kombination mit der Software SILAB Verwendung. Die Anlage verfügt über eine vollständig instrumentierte Fahrerkabine, die auf einem Bewegungssystem aufgebaut ist. Grundlage bildet dabei eine Stewart-Plattform mit sechs Freiheitsgraden, die lineare Beschleunigungen bis zu 5 m/s² simulieren kann. Hierfür agieren sechs elektrische Aktuatoren in Verbindung mit drei passiven pneumatischen Aktuatoren. In der Kuppel des Fahrsimulators befindet sich eine sphärische Leinwand, die eine Frontsicht von 180° erlaubt. Der Abstand zwischen dem Augpunkt des Fahrers und der Leinwand beträgt

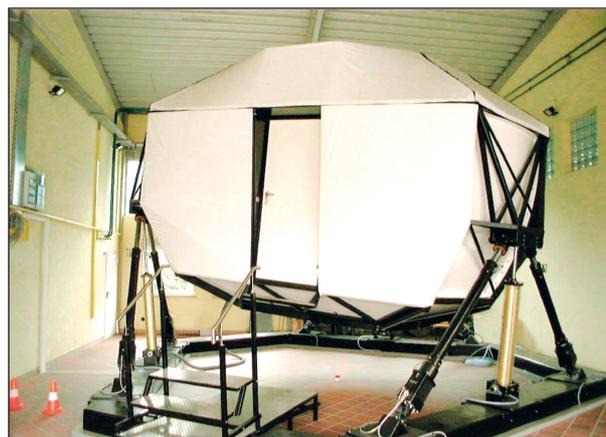


Bild 3: Dynamischer Fahrsimulator der WIVW GmbH

ungefähr 2,90 m. Das Bild wird über drei, in der Kuppel angebrachte Beamer (LCD-Technik) mit je einer Auflösung von 1.400 × 1.050 Pixel und einem Lichtstrom von 4.080 ANSI-Lumen projiziert. Als Rück- und Außenspiegel dienen LCD-Displays. Bild 3 zeigt den dynamischen Fahrsimulator in der Versuchshalle.

Simuliert wird als EGO-Fahrzeug ein BMW 520i, Baureihe E39 mit Automatikgetriebe (analog zum statischen Simulator), der in Form einer serienfertigen Fahrerkabine in der Kuppel verankert ist. Die Fahrgeräusche des EGO-Fahrzeugs können in Abhängigkeit von Drehzahl, Last, Wind- und Abrollgeräuschen sowie der Fahrgeschwindigkeit dargestellt werden. Hierzu dient ein 5.1 Lautsprechersystem. Die gesamte Simulationsanlage wird über 15 Rechner (technisch analog zum statischen Simulator) in einem 1.000-Mbit-Netzwerk betrieben.

2.2.3 Reales und simuliertes Versuchsgelände

Der reale Fahrversuch fand auf dem Testgelände der Universität der Bundeswehr in München (UBW München) statt. Hierzu wurde ein etwa 800 m langes Teilstück eines ehemaligen Flugfeldes verwendet. Als Versuchsträger (EGO-Fahrzeug) diente ein weißer Audi A6 3.0 TDI, Baureihe C7 mit Automatikgetriebe. Für Folgefahrten wurde als vorausfahrendes Fahrzeug ein weißer Mercedes-Benz C200, Baureihe W203 gewählt.

Ein Luftbild des Versuchsgeländes der UBW München ist in Bild 4 dargestellt. Es gilt zu beachten, dass die virtuelle Welt entsprechend der Abmessung und landschaftlichen Beschaffenheit der realen Welt gestaltet wurde. Alle in der virtuellen Welt

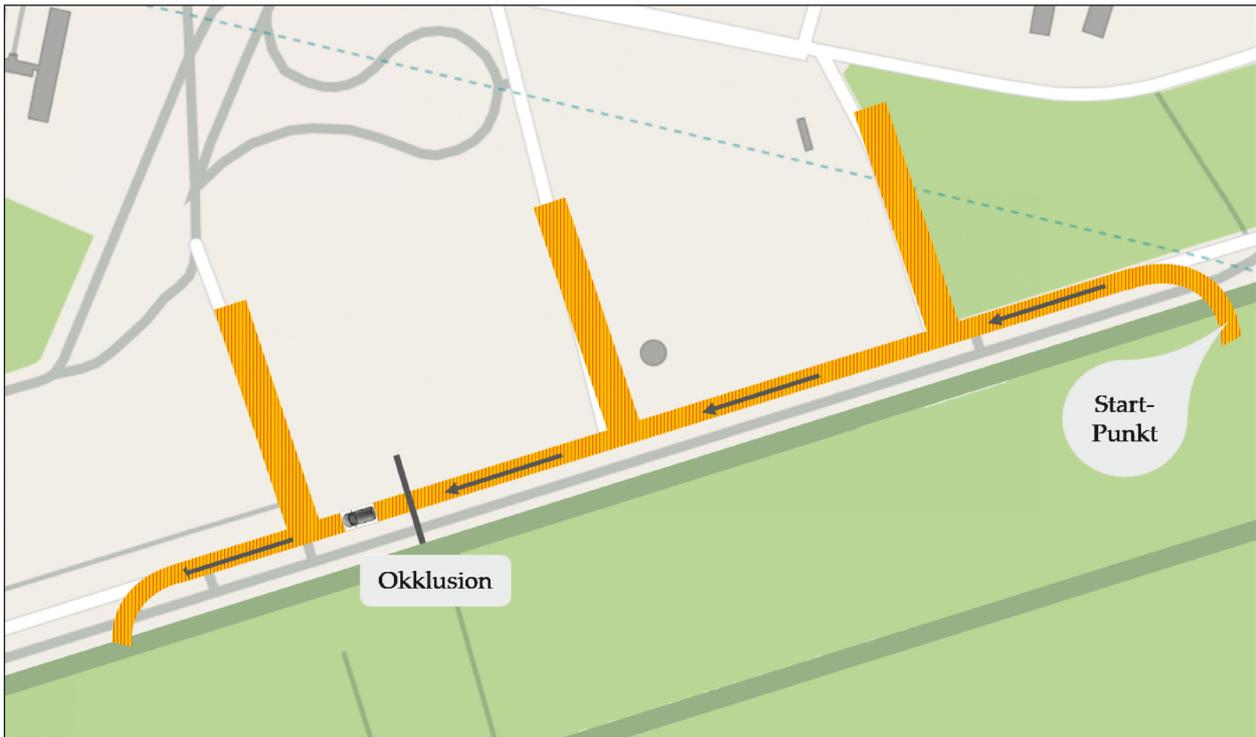


Bild 4: Luftbild und Planskizze des Versuchsgeländes der UBW München. Der gelb schraffierte Bereich zeigt die simulierten Streckenabschnitte. Die Versuchsfahrt erfolgte in Pfeilrichtung

simulierten Streckenabschnitte sind in Bild 4 gelb gekennzeichnet. In der Realfahrt konnte auf dem Testgelände baulich bedingt kein Rundkurs gefahren werden. Daher wendeten die Versuchsteilnehmer an den Endpunkten der 800 m langen Geraden für jeden Durchgang. Der virtuellen Welt hingegen wurden zusätzlich zwei Kurvenstücke hinzugefügt, wodurch die simulierte Teststrecke in einer Endlosschleife durchfahren werden konnte. Als vorausfahrendes Fahrzeug für Folgefahrten wurde ein silberfarbener Škoda Octavia II, Baureihe 1Z simuliert.

2.2.4 Subjektive Bewertungsskala (SBS)

Um die subjektive Kritikalität von Situationen im Straßenverkehr oder im simulierten Straßenverkehr zu erfassen, wurde die Subjektive Bewertungsskala (SBS; NEUKUM & KRÜGER, 2003) herangezogen. Dieses Instrument wurde am Interdisziplinären Zentrum für Verkehrswissenschaften (IZVW) entwickelt und intern validiert. In der vorliegenden Studie fand eine modifizierte Version von NEUKUM, LÜBBEKE, KRÜGER, MAYSER und STEINLE (2008) Anwendung. Potenziell „gefährliche“, „unangenehme“ oder „harmlose“ Situationen können auf der Skala differenziert durch numerische Angaben abgebildet werden, siehe Bild 5. Der Begriff „gefährlich“ soll dabei eine Situation erfassen, die unter normalen Bedin-

Die Situation war ...	
nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Bild 5: Subjektive Bewertungsskala (SBS)

gungen im Straßenverkehr nicht mehr tolerierbar bzw. unkontrollierbar ist (sieben bis zehn Skalenpunkte). Die Kategorie „unangenehm“ beschreibt Situationen, die Fahrer nur kurzzeitig im Straßenverkehr erleben möchten (vier bis sechs Skalenpunkte). Eine „harmlose“ Situation wird im Straßenverkehr als unbedenklich empfunden (einer bis drei Skalenpunkte). Falls eine Person eine Verkehrssituation nicht wahrnahm, wird dies mit null Skalen-

punkten erfasst. Vorteil dieser Skala ist nach NEUKUM et al. (2008) unter anderem, dass eine klare Toleranzschwelle für die Verkehrssicherheit ab sieben Skalenpunkten ausgemacht werden kann.

2.2.5 Simulationsszenarien

Das Experiment bestand aus drei Versuchsblöcken, die verschiedene Simulationsszenarien umfassten. Block I diente der Untersuchung der Längsführung anhand von Abstandseinschätzungen bei konstanter Geschwindigkeit. Hier durchfuhren die Probanden Szenarien zum „Abstand herstellen“, zum „Abstand schätzen“ und ein Szenario zur Schätzung des Zeitabstands bis zu einer Kollision bei verdeckter Sicht, den sogenannten „Okklusionsversuch“. Block II beinhaltete ein zusammengefasstes Szenario, das die Einhaltung von Abständen bei variierender Geschwindigkeit maß: „Folgefahrt mit Beschleunigung“ und „Folgefahrt mit Verzögerung“. In Block III wurde die Wahrnehmung der Querführung durch Einschätzung seitlicher Abstände untersucht. Die Probanden durchfuhren hierfür sogenannte „Leitbakengassen“.

Um eventuelle Reihenfolgeeffekte zu kontrollieren, wurde die Blockabfolge zwischen den Probanden teilweise permutiert: Je Fahrsimulator absolvierte ein Drittel der Teilnehmer die Abfolge I – II – III, ein Drittel die Abfolge II – III – I und ein Drittel die Abfolge III – I – II. Innerhalb von Block I wurden die drei zu fahrenden Szenarien unter den Probanden vollständig permutiert.

Zusätzlich war es vorgesehen, die Querführung anhand eines „Ausweichmanövers“ (Block IV) zu untersuchen. Block IV wurde hierbei immer als letzter Versuchsteil durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit fand die Untersuchung des Ausweichmanövers jedoch nicht statt. Aus diesem Grund ist auf eine differenzierte Beschreibung und Diskussion der Ergebnisse verzichtet worden.

2.2.5.1 Abstand herstellen

Der Ablauf dieses Szenarios gestaltete sich wie folgt: Nach dem Start der Simulation sah der Proband die Teststrecke, auf der sich ein silberfarbener Škoda Octavia befand. Sobald der Versuchsteilnehmer losfuhr, setzte sich ebenfalls der Škoda als vorausfahrendes Fahrzeug in Bewegung. Nach kurzer Beschleunigungsphase erreichte das Vorderfahrzeug eine Geschwindigkeit von 50 km/h, die



Bild 6: Lenkrad des statischen Fahrsimulators mit Markierung des verwendeten Tasters

es fortan konstant hielt. Aufgabe des Probanden war es nun, hinter dem Fahrzeug mit einem konstanten Abstand herzufahren. Folglich sollte der Proband ebenfalls mit 50 km/h fahren. Wie groß der Abstand sein sollte, wurde durch den Versuchsleiter über die Wechselsprechanlage mitgeteilt. Der Versuchsteilnehmer sollte beispielsweise einen für sich als „harmlos“ empfunden Abstand herstellen. Um den Zeitpunkt, bzw. den Abstand zu markieren, drückte der Proband den rechten Taster am Lenkrad (siehe Markierung in Bild 6).

Nach Betätigung des Tasters wurde weiterhin dem Vorderfahrzeug gefolgt, bis dieses in die dritte Einmündung nach rechts abbog. Der Proband folgte dem Fahrzeug nicht weiter sondern blieb auf dem Rundkurs. Auf Hinweis des Versuchsleiters wurde der Proband gebeten anzuhalten, um einige Fragen zu der kürzlich erlebten Situation zu beantworten. Der eigens konstruierte Fragebogen hierfür ist in Anhang B abgedruckt. Anschließend durfte der Versuchsteilnehmer in die nächste Runde weiterfahren, um erneut einen Abstand auf Mitteilung des Versuchsleiters herzustellen. Bild 7 illustriert Mitschnitte der Simulation aus Sicht des Probanden für einen beispielhaften „harmlosen“, „unangenehmen“ und „gefährlichen“ Abstand.

Insgesamt war es vorgesehen, den Probanden drei verschiedenen große Kritikalitäten einstellen zu lassen („harmlos“, „unangenehm“ und „gefährlich“), die als unabhängige Variable fungierten. Hierfür wurden folglich drei Runden im Szenario gefahren. Die Reihenfolge der drei zu fahrenden Kritikalitäten variierte dabei zwischen den Versuchsteilnehmern. Jeder Proband wurde randomisiert einer Reihen-

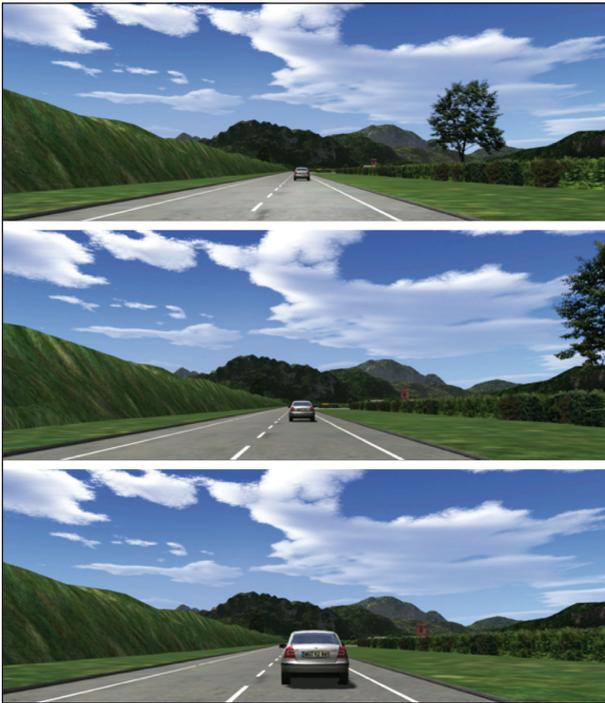


Bild 7: Simulationsmitschnitte des Szenarios „Abstand herstellen“ aus Probandensicht für einen beispielhaften „harmlosen“ Abstand (oben), „unangenehmen“ Abstand (mittig) und „gefährlichen“ Abstand (unten)

folge zugeordnet. Bei einer Stichprobengröße von $N = 30$ je Simulator durchfuhren jeweils zehn Probanden dieselbe Abfolge von Kritikalitäten. Das Maß der abhängigen Variable entsprach in diesem Fall dem eingestellten Abstand zum Vorderfahrzeug in Metern.

2.2.5.2 Abstand schätzen

Analog zum Szenario „Abstand herstellen“ sah der Proband nach dem Start der Simulation die Teststrecke, auf der ebenfalls in einigen Metern Entfernung der silberfarbene Škoda Octavia stand. Sobald der Versuchsteilnehmer losfuhr, setzte sich der Škoda als vorausfahrendes Fahrzeug in Bewegung. Außerdem erschien in diesem Szenario ein sogenannter „Enhanced Reality Strip“ (ERS) zwischen dem EGO-Fahrzeug des Probanden und dem Vorderfahrzeug. Eine Fahrt im statischen Simulator mit ERS-Unterstützung ist in Bild 8 dargestellt und kann für die nachfolgenden Erläuterungen hinzugezogen werden.

Unter dem ERS ist ein Anzeigeelement für den Probanden zu verstehen, das ihm signalisiert, wie groß der Abstand zwischen beiden Fahrzeugen ist. Hierfür wird während der Simulation ein Streifen auf der Fahrbahn eingeblendet, der die Farben

Gelb, Grau und Blau annehmen kann. Hat der ERS die Farbe Gelb, ist der Abstand zwischen EGO-Fahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug zu groß. In diesem Fall müsste der Proband näher auf den Škoda aufschließen. Wechselt der ERS dann zur Farbe Grau, ist der gewünschte Abstand präzise eingestellt. Schließt der Proband allerdings zu weit auf das Vorderfahrzeug auf, zeigt der ERS die Farbe Blau. Nun wäre es nötig, den Abstand zum Vorderfahrzeug wieder größer werden zu lassen.

Ziel war es also, dass der Proband die Farbe Grau während der Folgefahrt einstellt und einhält. Das vorausfahrende Fahrzeug hielt die Geschwindigkeit konstant mit 50 km/h. Bild 9 verdeutlicht die Fahrt mit ERS als Simulationsmitschnitt aus Sicht des Probanden.

In diesem Szenario war folglich keine zusätzliche Abstandsangabe durch den Versuchsleiter notwendig, da der einzustellende Abstand über die Simulation vorgegeben wurde. Äquivalent zum Szenario „Abstand herstellen“ drückte der Proband zu einem beliebigen Zeitpunkt den rechten Taster am Lenkrad (siehe Markierung in Bild 6), sobald er den ERS zufriedenstellend auf die Farbe Grau austariert hatte. Der Tastendruck diente hierbei ausschließlich der Parallelisierung zum Szenario „Abstand herstellen“. Nach Betätigung des Tasters folgte der Proband weiterhin dem Vorderfahrzeug, bis dieses in die dritte Einmündung nach rechts abbog. Der Proband seinerseits blieb auf dem Rundkurs. Auf Hinweis des Versuchsleiters wurde der Proband gebeten anzuhalten, um den zuvor eingestellten Abstand u. a. hinsichtlich seiner Kritikalität auf der subjektiven Bewertungsskala (SBS) im Fragebogen (siehe Anhang B) einzuschätzen. Anschließend durfte der Versuchsteilnehmer in die nächste Runde weiterfahren, um erneut einen Abstand mittels ERS herzustellen.

Insgesamt folgten die Probanden dem Vorderfahrzeug in drei verschiedenen großen Zeitabständen (2,25 s, 1,50 s und 0,75 s). Hierfür wurden folglich drei Runden im Szenario gefahren. Die Reihenfolge der drei einzustellenden Abstände variierte dabei zwischen den Versuchsteilnehmern. Jeder Proband wurde randomisiert einer Reihenfolge zugeordnet. Bei einer Stichprobengröße von $N = 30$ je Simulator durchfuhren jeweils zehn Probanden dieselbe Abfolge von Abständen. Als abhängige Variable diente die subjektive Bewertung auf der SBS.



Bild 8: Fahrt im statischen Simulator mit „Enhanced Reality Strip“ (ERS)



Bild 9: Simulationsschnitt des Szenarios „Abstand schätzen“ aus Probandensicht



Bild 10: Simulationsschnitt des Okklusionsversuchs aus Probandensicht

2.2.5.3 Okklusionsversuch

In diesem Szenario fuhr der Proband nach Initialisierung der Simulation zunächst ohne vorausfahrendes Fahrzeug die simulierte Teststrecke entlang. Er wurde instruiert, exakt 50 km/h einzuhalten. Am Ende der langen Geraden (siehe Planskizze in Bild 4) stand ein silberfarbener Škoda Octavia auf der Fahrbahn. Der Proband sollte nun mit 50 km/h auf das Fahrzeug auffahren und eine Kollision beabsichtigen, siehe Bild 10 als Mitschnitt der Simulation aus Probandensicht.

Kurz bevor er jedoch das stillstehende Fahrzeug erreichte, wurde eine Okklusion (Verdeckung)

ausgelöst: Statt der simulierten Situation wurde nur noch ein weißer Bildschirm projiziert. Die Okklusion hielt so lange an, bis der Proband das stehende Fahrzeug vollständig „durchfahren“ hatte. An dem Punkt, an dem der Proband glaubte während der Okklusion mit dem Fahrzeug zu „kollidieren“, sollte er den rechten Taster am Lenkrad drücken. Darüber hinaus wurde der Proband instruiert sich zu konzentrieren und weder aus Reflex das Bremspedal zu betätigen, noch seine Geschwindigkeit abfallen zu lassen. Nachdem die Okklusion beendet war und die Simulationsumgebung wieder erschien, durfte der Proband anhalten. Bei Stillstand des Fahrzeugs galt es nun, einige Fragen zur Situationsbewertung zu beantworten. Der standardisierte Fragebogen hierfür ist in Anhang B abgedruckt. Anschließend fuhr der Proband weiter in die nächste Runde, um den Okklusionsversuch erneut nach demselben Schema zu durchfahren.

Insgesamt erfolgten drei Okklusionen, die hinsichtlich der unabhängigen Variablen „Zeit bis zur Kollision“ („Time to Collision“; TTC) variiert wurden (2,5 s, 2,0 s und 1,5 s). Demnach fuhr der Proband in diesem Szenario drei Runden. Die Reihenfolge der drei TTCs variierte dabei zwischen den Versuchsteilnehmern. Jeder Proband wurde randomisiert einer Reihenfolge zugeordnet. Bei einer Stichprobengröße von $N = 30$ je Simulator durchfahren jeweils zehn Probanden dieselbe Abfolge von TTC. Als Maß für die abhängige Variable diente der Unterschied zwischen der realen TTC und der vom Probanden geschätzten TTC.

2.2.5.4 Folgefahrt mit Beschleunigung oder Verzögerung

Zu Beginn des Szenarios sah der Proband nach dem Start der Simulation den silberfarbenen Škoda Octavia in einigen Metern Entfernung auf der simu-

lierten Teststrecke stehen. Sobald der Proband losfuhr, setzte sich ebenfalls der Škoda als vorausfahrendes Fahrzeug in Bewegung. Außerdem erschien zwischen dem Vorderfahrzeug und dem EGO-Fahrzeug des Versuchsteilnehmers der ERS. Dieser sollte, wie in Kapitel 2.2.5.2 (Abstand schätzen) beschrieben, auf die Farbe Grau eingestellt werden. Sobald der Proband die gerade Fahrbahn der Teststrecke erreichte, verschwand der ERS. Dennoch musste der zuvor mithilfe des ERS hergestellte Abstand beibehalten werden. In diesem Szenario veränderte das Vorderfahrzeug, sobald der ERS verschwunden war, seine Geschwindigkeit: Entweder beschleunigte es, oder es verzögerte. Beschleunigte das Vorderfahrzeug, so erhöhte es seine Geschwindigkeit von 30 km/h auf 50 km/h. Bremsste es ab, reduzierte sich seine Geschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h. In einer Runde veränderte das Vorderfahrzeug nur einmal seine Geschwindigkeit. Hierbei war dem Versuchsteilnehmer unbekannt, in welcher Runde das Vorderfahrzeug beschleunigen oder verzögern würde. Aufgabe des Versuchsteilnehmers war es nun, obwohl sich die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs änderte, den Abstand während der Folgefahrt konstant zu halten. Folglich musste der Proband ebenfalls auf ca. 50 km/h beschleunigen oder auf ca. 30 km/h abbremmen. Bild 11 illustriert die Situation unmittelbar nach Beschleunigungsbeginn des Vorderfahrzeugs und unmittelbar nach Bremsbeginn aus Sicht des Probanden.



Bild 11: Simulationsmitschnitte des Szenarios „Folgefahrt mit Beschleunigung“ (oben) und des Szenarios „Folgefahrt mit Verzögerung“ (unten) aus Probandensicht

Nach der Beschleunigungs- bzw. Bremssituation fuhr der Proband mit neu eingestellter Geschwindigkeit weiter hinter dem Vorderfahrzeug her, bis dieses in die dritte Einmündung nach rechts abbog. Der Proband seinerseits blieb auf dem Rundkurs und wurde schließlich bei Stillstand des EGO-Fahrzeugs zu der zuvor erlebten Situation befragt. Der verwendete Fragebogen hierfür ist in Anhang B abgedruckt. Anschließend durfte der Versuchsteilnehmer in die nächste Runde weiterfahren und die nächste Folgefahrt mit Beschleunigung oder Verzögerung absolvieren.

Insgesamt waren drei Runden mit Beschleunigung und drei Runden mit Verzögerung des Vorderfahrzeugs vorgesehen. Dabei beschleunigte das Vorderfahrzeug entweder mit $0,5 \text{ m/s}^2$, $1,5 \text{ m/s}^2$ oder $2,5 \text{ m/s}^2$. Die Verzögerungsintensitäten betragen $-1,0 \text{ m/s}^2$, $-3,0 \text{ m/s}^2$ oder $-5,0 \text{ m/s}^2$. Auf eine Runde mit Beschleunigung folgte eine Verzögerung und umgekehrt. Zusammengefasst wurden folglich sechs Runden im Szenario gefahren. Die Reihenfolge der sechs Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsintensitäten variierte dabei zwischen den Versuchsteilnehmern. Es wurde berücksichtigt, dass in keiner Reihenfolge die stärkste Verzögerung von $-5,0 \text{ m/s}^2$ in der ersten oder zweiten Runde erlebt wurde, um eine gewisse Gewöhnung der Versuchsteilnehmer zu gewährleisten und Schreckreaktionen zu vermeiden.

Jeder Proband wurde randomisiert einer von sechs Reihenfolgen zugeordnet. Bei einer Stichprobengröße von $N = 30$ je Simulator durchfahren jeweils fünf Probanden dieselbe Abfolge von Folgefahrten. Für das Beschleunigungsszenario diente sowohl die Reaktionszeit des Probanden bis zum Einleiten seiner Beschleunigung als auch seine maximale Beschleunigung als Maß der abhängigen Variablen. Im Verzögerungsszenario wurde einerseits als abhängige Variable die Reaktionszeit des Probanden bis zum Einleiten der Verzögerung, andererseits der minimale Abstand zum Vorderfahrzeug gewählt. Aufgrund von nicht vergleichbarem Ansprechverhalten des Bremspedals im statischen und dynamischen Simulator (maximale Verzögerung) fiel im Szenario „Folgefahrt mit Verzögerung“ die Entscheidung gegen die abhängige Variable „maximale Verzögerung“ und für den „minimalen Abstand zum Vorderfahrzeug“ als zusätzliche abhängige Variable.

2.2.5.5 Gassendurchfahrt

In diesem Szenario sah der Proband nach dem Start der Simulation den silberfarbenen Škoda Octavia als vorausfahrendes Fahrzeug in einigen Metern Abstand vor sich auf der Fahrbahn stehen. Sobald Proband und Vorderfahrzeug losfuhren, galt zunächst das Ziel, den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug im grauen Bereich des ERS zu halten. Hierbei wurde mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h gefahren. In der Mitte der Teststrecke fuhr das Vorderfahrzeug an den rechten Straßenrand und der ERS verschwand. Der Proband seinerseits sollte jedoch mit konstant 50 km/h weiterfahren. Vor ihm zeigte sich nun eine Gasse, die mittels einer linken und einer rechten Reihe von Leitbaken konstruiert wurde. Aufgabe des Versuchsteilnehmers war es, die Gasse zu durchfahren und dabei die Geschwindigkeit von 50 km/h beizubehalten. Nach Durchfahrt der Gasse durfte der Proband anhalten und die soeben erlebte Situation anhand der standardisierten Fragen (siehe Anhang B) bewerten. Die Breite der zu durchfahrenden Gasse wurde als unabhängige Variable variiert; es war vorgesehen, vier verschiedene Gassenbreiten von 3,75 m, 3,25 m, 2,75 m und 2,25 m zu absolvieren. Falls der Proband seiner Meinung nach nicht ohne Kollision die Gasse durchfahren konnte, durfte er vor der Gasse anhalten und die Durchfahrt verweigern. Sinn der vorherigen Folgefahrt war es, durch das vorausfahrende Fahrzeug die Leitbakengasse möglichst lange zu verdecken. Auf diese Weise sollte der Proband annähernd spontan die Gasse erblicken, um dementsprechend das Fahrzeug zu positionieren bzw. die Durchfahrt abubrechen. In Bild 12 ist eine Leitbakengasse in der Breite von 3,25 m als Simulationsmitschnitt aus Probandensicht illustriert.

Die vier verschiedenen Gassenbreiten wurden in vier aufeinander folgenden Runden auf der simu-



Bild 12: Simulationsmitschnitt des Szenarios „Gassendurchfahrt“ aus Probandensicht

lierten Teststrecke präsentiert. Die Reihenfolge der Gassenbreiten variierte dabei zwischen den Versuchsteilnehmern. Jeder Proband wurde randomisiert einer von drei Reihenfolgen zugeordnet. Dabei galt es, die engste Gasse (2,25 m) nie in der ersten Runde zu präsentieren. Bei einer Stichprobengröße von $N = 30$ je Simulator durchfahren jeweils zehn Probanden dieselbe Abfolge von Gassenbreiten. Als Maß für die abhängige Variable diente sowohl die Fahrgeschwindigkeit des Probanden bei Gasseneinfahrt als auch die Spurposition während der Gassendurchfahrt.

2.3 Versuchsdurchführung

Das Experiment fand sowohl im statischen Fahr-simulator der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in Bergisch Gladbach als auch im dynamischen Fahrsimulator des Interdisziplinären Zentrums für Verkehrswissenschaften (IZVW) der Universität Würzburg statt. Der Zeitraum für die Testung umfasste in beiden Simulatoren jeweils vier bis fünf Wochen im April/Mai 2013 (dynamisch) und im November/Dezember 2013 (statisch). Der jeweilige Versuchsleiter vor Ort betreute das Experiment nach einer standardisierten Abfolge. Insgesamt wurde der Versuchsablauf kongruent für beide Simulationen gehalten, um die Vergleichbarkeit der Methodik sicherzustellen. Hierfür hospitierte einerseits die Versuchsleitung des statischen Simulators bei Versuchen im dynamischen Simulator, andererseits kontrollierte die Universität Würzburg den Versuchsablauf im statischen Simulator und nahm ihn ab.

Nach Begrüßung des Versuchsteilnehmers im Kontrollraum des Fahrsimulators, wurde er gebeten, einige Angaben zu seiner Person zu vermerken (Alter, Geschlecht, Händigkeit, Beeinträchtigungen des Sehvermögens, Beeinträchtigung der Fahrtüchtigkeit, Zeitpunkt des Führerscheinerwerbs, Fahrleistung pro Jahr sowie die Teilnahme an Fahr-sicherheitstrainings). Anschließend erklärte der Versuchsleiter, dass sich die Studie mit der Validierung verschiedener Fahrsimulatoren beschäftige. Hierfür würden Einschätzungen von Abständen und Geschwindigkeiten verwendet. Ebenfalls erhielt der Proband Auskunft über die simulierte Teststrecke und die Anweisung, er solle stets dem Rundkurs folgen. Generell bestand für den Probanden vor und während der Studie die Möglichkeit, beliebig viele Fragen zu stellen. Die Versuchsdauer war insgesamt mit einer Stunde veranschlagt, wobei das

Experiment in drei Blöcke unterteilt wurde. Nach jedem Block konnte der Proband eine Pause einlegen, sich verpflegen, oder die Toilette aufsuchen. Zu jedem Zeitpunkt des Experiments war es dem Probanden möglich, seine Partizipation ohne die Angabe von Gründen abzubrechen. Er hätte dennoch seine Aufwandsentschädigung im vollen Umfang erhalten.

Mit Abschluss der Vorabinformation durfte der Versuchsteilnehmer unter Aufsicht des Versuchsleiters im Fahrsimulator Platz nehmen. Der Fahrersitz konnte nun vom Probanden entsprechend seiner Sitzgewohnheit eingestellt werden. Für ein realitätsnahes Erleben durfte der Proband sich anschnallen. Bereits vor Versuchsbeginn erfuhr der Versuchsteilnehmer, dass er im Laufe des Experiments den rechten Taster am Lenkrad benötigen wird. Um den Taster möglichst schnell drücken zu können, sollte der rechte Daumen während der Fahrt auf dem Taster aufliegen. Von nun an konnte der Versuchsleiter vom Kontrollraum aus über eine Wechselsprechanlage mit dem Versuchsteilnehmer im Fahrsimulator kommunizieren. Vor Beginn des Experiments durfte der Proband auf der simulierten Teststrecke für maximal fünf Minuten beliebig viele Runden fahren. Entsprechend der Instruktion beschleunigte und verzögerte der Proband mehrfach nach seinem Ermessen. Auf diese Weise sollte sowohl eine (Wieder-)Eingewöhnung an die Simulationsumgebung als auch eine Eingewöhnung an das Ansprechverhalten von Gas, Bremse und Lenkung sichergestellt werden.

Anschließend instruierte der Versuchsleiter das erste Szenario unmittelbar am Mock-Up (nicht über die Wechselsprechanlage), indem er dem Probanden die Fahraufgabe erläuterte. Zwischenfragen wurden dabei hinreichend beantwortet, ohne die konkrete Forschungsintention darzulegen. Der Versuchsteilnehmer erhielt für jedes Szenario einen neuen Fragebogen (siehe Anhang B), der vor Beginn des Durchgangs auf den Beifahrersitz des Mock-Ups gelegt wurde. So war es dem Probanden möglich, den Bogen in den Befragungsintervallen schnell zur Hand zu nehmen. Jedes Szenario erforderte die mehrmalige subjektive Einschätzung der Situation auf der Subjektiven Bewertungsskala (SBS). Die Kategorien der Skala wurden dem Probanden einmal vor dem ersten gefahrenen Szenario mündlich erklärt. Falls keine weiteren Fragen seitens des Versuchsteilnehmers bestanden, startete der Versuchsleiter vom Kontrollraum aus die Simulation für das erste zu fahrende Szenario.

Alle subjektiven Angaben aus den Befragungen teilte der Proband dem Versuchsleiter über die Wechselsprechanlage mit, damit diese auf einem Protokollbogen erfasst werden konnten. Nach Absolvierung eines Szenarios wurde der Versuchsteilnehmer nach seinem gegenwärtigen Befinden und nach Anzeichen der Bewegungskrankheit gefragt. Äußerte der Proband kein Unwohlsein, konnte er mit den nachfolgenden Szenarien fortfahren. Hierfür war jeweils eine erneute Instruktion nach oben beschriebenem Ablauf notwendig. Die Simulation wurde nach Abschluss eines Szenarios beendet und für das jeweils anschließende Szenario neu gestartet. Das Experiment galt mit Absolvierung des letzten zu fahrenden Szenarios als abgeschlossen. Der Versuchsteilnehmer erhielt für die Versuchsdauer von ca. eineinhalb Stunden eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 20 Euro.

2.4 Datenanalyse und statistische Auswertung

Alle Szenarien wurden mithilfe der Simulationssoftware „SILAB“ (Version 4.0; WIVW GmbH) programmiert und gestaltet. SILAB fand sowohl auf dem statischen als auch auf dem dynamischen Fahrsimulator Anwendung, um die Simulation zu steuern und Verhaltensdaten aufzuzeichnen. Dabei wurde eine Aufzeichnungsrate von 120 Hz im statischen, und von 100 Hz im dynamischen Simulator verwendet. Im ersten Schritt wurden .csv Dateien in SILAB angelegt, die unmittelbar in „SPSS Statistics“ (Version 20; IBM Corp., 2011) eingelesen wurden. Entsprechend der szenarienabhängigen zeitlichen Marker (beispielsweise Tastendrucke), konnten die Verhaltensdaten im nächsten Schritt für jeden Probanden parametrisiert werden.

Zur interferenzstatistischen Überprüfung der zuvor aufgestellten Hypothesen diente je Szenario eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor. In jedem Szenario wurde als erster Faktor die Zwischengruppenvariable „Simulator“ mit zwei Faktorstufen (statisch und dynamisch) definiert. Je nach Szenario variierte als zweiter Faktor die messwiederholte Variable und deren Faktorstufenanzahl, die in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Die Auswirkungen der Manipulationen wurden auf der entsprechenden szenarienspezifischen abhängigen Variable erfasst. Für Block I und II lag dem Versuch demnach ein 2×3 faktorielles Design,

Versuchsblock	Validierungsszenario	messwiederholte Variable	Faktorstufen
I	Abstand herstellen	subjektive Kritikalität	harmlos unangenehm gefährlich
I	Abstand schätzen	Zeitabstand zum Vorderfahrzeug	2,25 s 1,50 s 0,75 s
I	Okklusionsversuch	Zeit bis zur Kollision	2,5 s 2,0 s 1,5 s
II	Folgefahrt Beschleunigung	Beschleunigung des Vorderfahrzeugs	0,5 m/s ² 1,5 m/s ² 2,5 m/s ²
II	Folgefahrt Verzögerung	Verzögerung des Vorderfahrzeugs	-1,0 m/s ² -3,0 m/s ² -5,0 m/s ²
III	Gassendurchfahrt	Gassenbreite	3,75 m 3,25 m 2,75 m 2,25 m

Tab. 1: Faktorstufen der messwiederholten Variablen aller Validierungsszenarien innerhalb des jeweiligen Versuchsblocks

Block III ein 2×4 faktorielles Design zugrunde. Folglich wurde für jedes Szenario separat eine messwiederholte multivariate Varianzanalyse (MANOVA) berechnet. Die Nullhypothese wurde verworfen, sobald von einer α -Fehlerwahrscheinlichkeit $< .05$ auszugehen war. In diesem Fall diente das partielle η^2 als relatives Effektstärkemaß, um die Größe des erklärten Varianzanteils in Relation zur Gesamtvarianz (einschließlich der unerklärten Fehlervarianz) zu bestimmen. Alle inferenzstatistischen Analysen wurden mittels „SPSS Statistics“ durchgeführt.

Üblicherweise empfiehlt es sich, in der Planung eines Experiments die Stichprobengröße a priori anhand der erwarteten Effektgröße f und der statistischen Power $(1 - \beta)$ festzulegen. Da allerdings eine Stichprobengröße von $N = 30$ pro Fahrsimulator aus versuchsökonomischen Gründen veranschlagt wurde, war es notwendig, eine Sensitivitätsanalyse mithilfe des Programms „G*Power“ (Version 3.1.4; FAUL, ERDFELDER, LANG & BUCHNER, 2007) durchzuführen. Bei gegebenem Stichprobenumfang von insgesamt $N = 60$, zwei zu vergleichenden Gruppen, drei messwiederholten Faktorstufen, einer α -Fehlerwahrscheinlichkeit von $.05$, einer Power von $(1 - \beta) = .95$ sowie einer angenommenen Populationskorrelation zwischen den Stufen des messwiederholten Faktors von $\rho = .5$, konnten Effekte ab einer Größe von $f = .39$ aufge-

funden werden. Entsprechend der Richtlinien von COHEN (1988) handelt es sich hierbei noch um Effekte mittlerer Größe.

3 Ergebnisse

3.1 Abstand herstellen

In Bild 13 ist der mittlere Abstand zum Vorderfahrzeug abhängig von der einzustellenden subjektiven Kritikalität im statischen und dynamischen Fahrsimulator dargestellt. Die Realfahrt liefert hierbei einen Referenzwert.

Eine 2×3 multivariate Varianzanalyse (MANOVA) mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor zeigte entsprechend der Hypothese keinen signifikanten Haupteffekt des Zwischengruppenfaktors „Simulator“ ($F(1, 57) = 1,04, p = .31, \eta^2 = .09$). Ebenfalls hypothesenkonform ist ein signifikanter Haupteffekt für den messwiederholten Faktor „Kritikalität“ ($F(1,77, 101,01) = 121,60, p < .001, \eta^2 = .68$) nachzuweisen. Die Freiheitsgrade wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert mit $\epsilon = .89$. Post-hoc-Vergleiche auf einem Bonferroni-korrigierten α -Fehlerniveau von $.017$ wiesen darauf hin, dass ein größerer Abstand gewählt wurde, je unkritischer die subjektive Vorgabe war (harmlos $>$ unangenehm $>$ gefährlich), für alle $p < .001$.

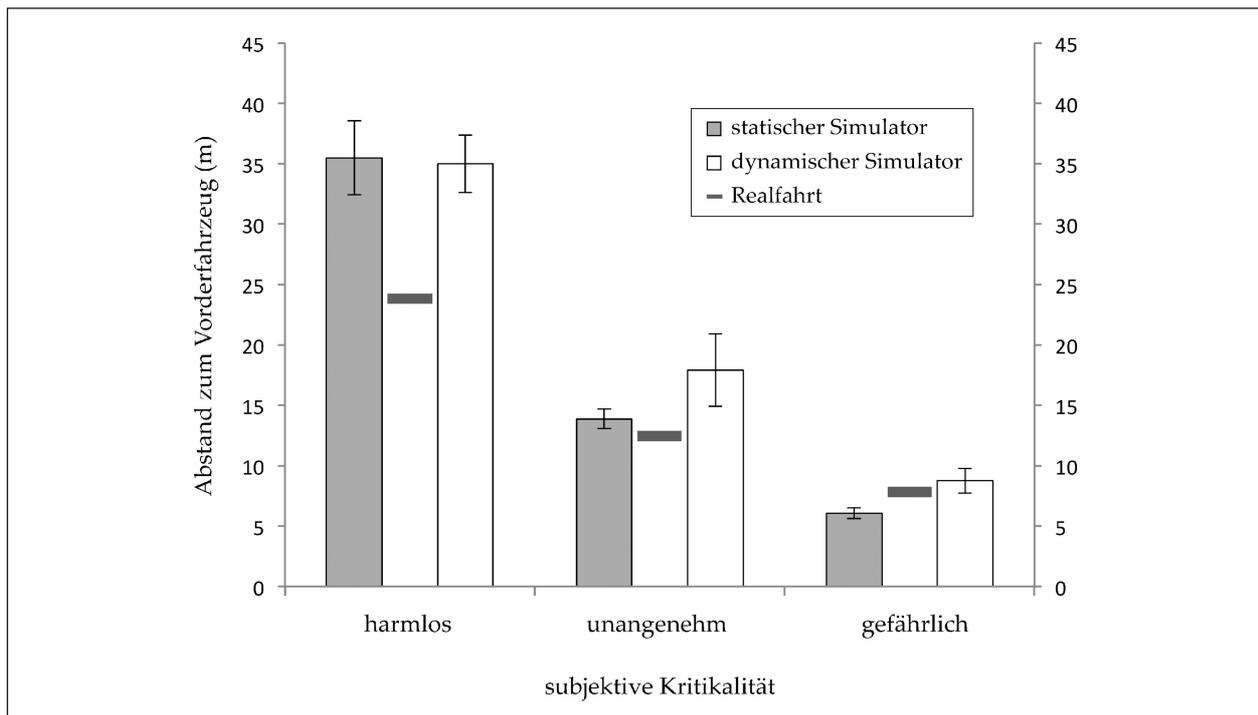


Bild 13: Mittlerer eingestellter Abstand der Probanden zum Vorderfahrzeug für die subjektiven Kritikalitäten „harmlos“, „unangenehm“ und „gefährlich“ im statischen und dynamischen Fahrsimulator sowie in der Realfahrt. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler

Eine Interaktion zwischen den Faktoren „Simulator“ und „Kritikalität“ konnte nicht gefunden werden ($F(1,77, 101,01) = .81, p = .43, \eta^2 = .01$).

3.2 Abstand schätzen

Bild 14 zeigt die mittlere subjektive Bewertung des Abstands zum Vorderfahrzeug abhängig von dem eingehaltenen Zeitabstand für den statischen und den dynamischen Fahrsimulator. Die Realfahrt liefert einen Referenzwert.

Eine 2×3 MANOVA mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor zeigte erwartungsgemäß keinen signifikanten Haupteffekt für den Zwischengruppenfaktor „Simulator“ ($F(1, 50) = .95, p = .34, \eta^2 = .02$). Für den messwiederholten Faktor „Zeitabstand“ konnte entsprechend der Hypothese ein signifikanter Unterschied der subjektiven Bewertungen zwischen den drei einzustellenden Abständen unabhängig vom getesteten Simulator festgestellt werden ($F(2, 100) = 291,25, p < .001, \eta^2 = .85$). Anschließende Post-hoc-Tests auf einem Bonferroni-korrigierten α -Fehlerniveau von .017 wiesen darauf hin, dass konsistent eine signifikant kritischere Bewertung getroffen wurde (ein hoher Wert mittlerer Skalenpunkte), wenn ein kleinerer Abstand zum Vorderfahrzeug eingehalten wurde (0,75 s

> 1,50 s > 2,25 s), für alle $p < .001$. Die Interaktion der Faktoren „Simulator“ und „Zeitabstand“ erwies sich statistisch als nicht signifikant ($F(2, 100) = .92, p = .40, \eta^2 = .02$).

3.3 Okklusionsversuch

Die mittlere Differenz zwischen der realen und der durch die Probanden geschätzten Zeit bis zur Kollision (TTC) ist in Bild 15 abhängig von der realen Zeit bis zur Kollision (TTC) jeweils für den statischen und den dynamischen Fahrsimulator aufgeführt. Die Realfahrt liefert einen Referenzwert.

Eine 2×3 MANOVA mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor wies entsprechend der Hypothese keinen signifikanten Unterschied zwischen statischem und dynamischen Simulator auf ($F(1, 57) = .82, p = .37, \eta^2 = .01$). Erwartungsgemäß zeigte sich ein Haupteffekt des messwiederholten Faktors „Zeit bis zur Kollision“ unabhängig vom untersuchten Simulator auf der Differenz zwischen geschätzter Zeit und Kollision ($F(1,56, 88,95) = 17,90, p < .001, \eta^2 = .24$). Die Freiheitsgrade wurden nach GREENHOUSE-GEISER korrigiert mit $\epsilon = .78$. Post-hoc-Vergleiche auf einem Bonferroni-korrigierten α -Fehlerniveau von .017 wiesen darauf hin, dass eine TTC von 2,5 s differenziert zu einer

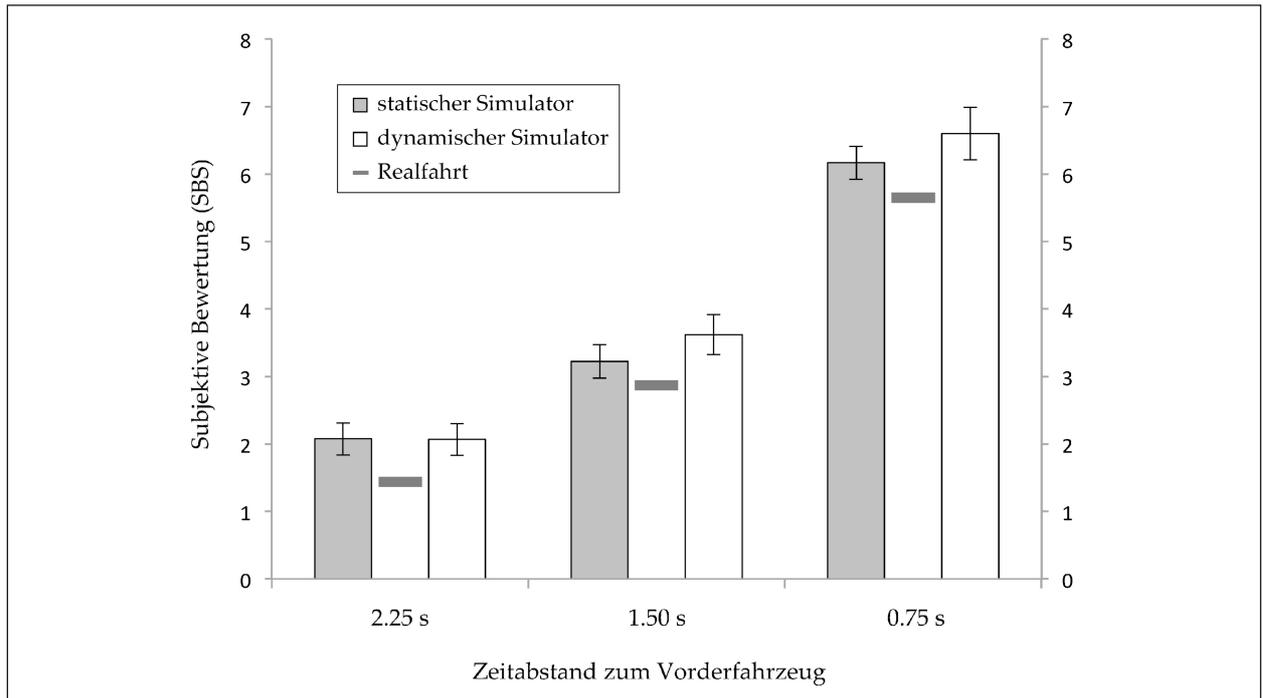


Bild 14: Mittlere subjektive Bewertung der Probanden abhängig vom hergestellten Zeitabstand im statischen und dynamischen Fahrsimulator sowie in der Realfahrt. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler

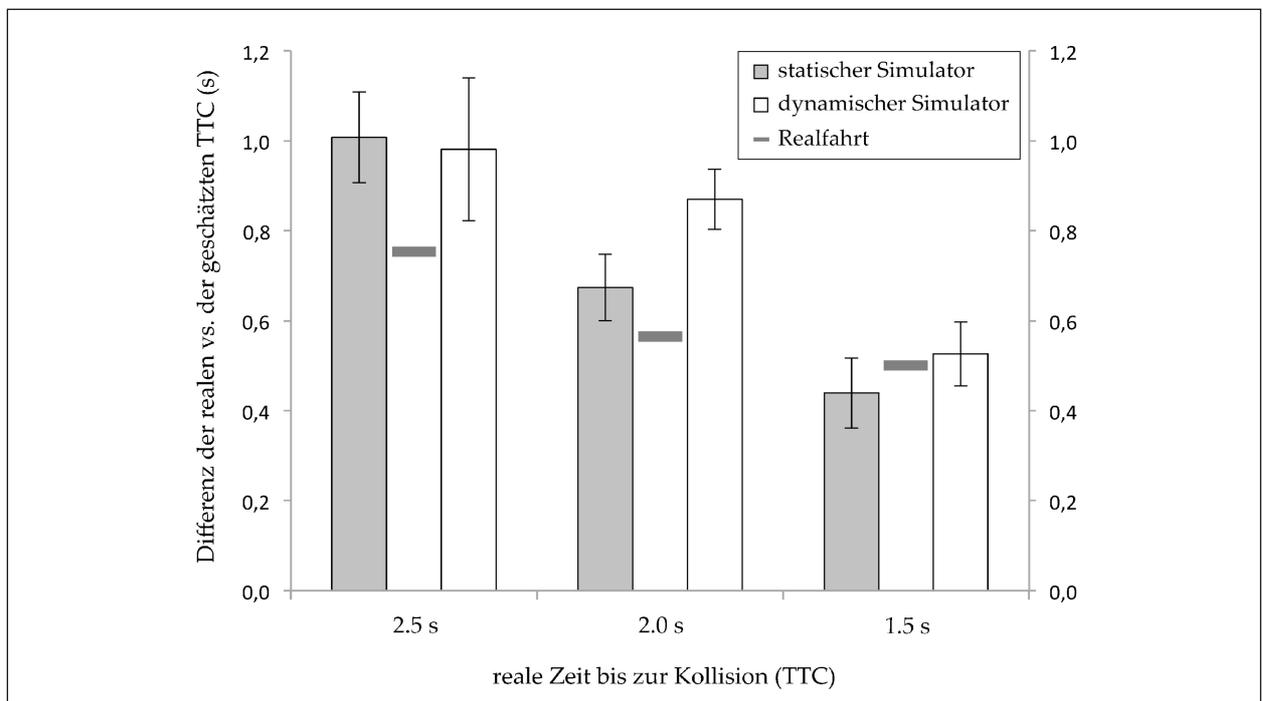


Bild 15: Differenz der mittleren realen TTC im Vergleich zur mittleren geschätzten TTC abhängig von der realen Zeit bis zur Kollision im statischen und dynamischen Fahrsimulator sowie in der Realfahrt. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler

TTC von 2,0 s ($p < .001$) und zu einer TTC von 1,5 s ($p < .001$) wahrgenommen wurde. Allerdings verpasste der Wahrnehmungsunterschied zwischen einer TTC von 2,0 s und 1,5 s das Signifi-

kanzniveau ($p = .06$). Es konnte keine Interaktion der Faktoren „Simulator“ und „Zeit bis zur Kollision“ beobachtet werden ($F(1,56, 88,95) = .85, p = .41, \eta^2 = .02$).

3.4 Folgefahrt mit Beschleunigung

In Bild 16 ist die mittlere Reaktionszeit der Probanden bis Beschleunigungsbeginn abhängig von der Beschleunigungsintensität des Vorderfahrzeugs im statischen und dynamischen Fahrsimulator dargestellt. Die Realfahrt liefert einen Referenzwert.

Eine 2×3 MANOVA mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor zeigte entgegen der Erwartung einen signifikanten Haupteffekt für den Zwischengruppenfaktor „Simulator“ ($F(1, 46) = 30,78, p < .001, \eta^2 = .40$). Dementsprechend wurde im statischen Simulator, unabhängig von der Beschleunigungsintensität des Vorderfahrzeugs, signifikant schneller auf die Beschleunigung reagiert. Für den messwiederholten Faktor „Beschleunigung des Vorderfahrzeugs“ konnte entsprechend der Hypothese ein signifikanter Unterschied in der Reaktionszeit zwischen den drei Intensitäten unabhängig vom getesteten Simulator festgestellt werden ($F(1,13, 52,18) = 31,70, p < .001, \eta^2 = .41$). Die Freiheitsgrade wurden nach GREENHOUSE-GEISER korrigiert mit $\epsilon = .57$. Anschließende Post-hoc-Tests auf einem Bonferroni-korrigierten α -Fehlerniveau von .017 wiesen darauf hin, dass die Reaktionszeit für die Wahrnehmung von $0,5 \text{ m/s}^2$ im Vergleich zu $1,5 \text{ m/s}^2$ ($p < .001$) und von $0,5 \text{ m/s}^2$ im Vergleich zu $2,5 \text{ m/s}^2$ ($p < .001$) erhöht war, sich

jedoch nicht zwischen $1,5 \text{ m/s}^2$ und $2,5 \text{ m/s}^2$ ($p = 1.00$) unterschied.

Des Weiteren konnte ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen den Faktoren „Simulator“ und „Beschleunigung des Vorderfahrzeugs“ festgestellt werden ($F(1,13, 52,18) = 19,15, p < .001, \eta^2 = .29$). Auch hier wurden die Freiheitsgrade nach GREENHOUSE-GEISER korrigiert mit $\epsilon = .57$. Anschließende t -Tests zeigen, dass ausschließlich bei einer Beschleunigungsintensität von $0,5 \text{ m/s}^2$ des Vorderfahrzeugs ein signifikanter Reaktionszeitvorteil im statischen Simulator gegenüber dem dynamischen Simulator festgestellt werden konnte ($t(22,49) = 3,98, p < .001, \eta^2 = .30$). Reaktionsunterschiede zwischen beiden Simulatoren bei einer Beschleunigung von $1,5 \text{ m/s}^2$ ($t(27,44) = 1,84, p = .08, \eta^2 = .06$) und $2,5 \text{ m/s}^2$ ($t(27,57) = 1,97, p = .06, \eta^2 = .07$) verfehlten das Signifikanzniveau.

Bild 17 zeigt die mittlere maximale Beschleunigung der Versuchsteilnehmer in Abhängigkeit von der Beschleunigungsintensität des Vorderfahrzeugs für den statischen und dynamischen Fahrsimulator. Die Realfahrt liefert einen Referenzwert. Eine 2×3 MANOVA mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor wies entgegen der Hypothese keinen signifikanten Haupteffekt für die maximale Beschleunigung hinsichtlich des untersuchten Simulators auf

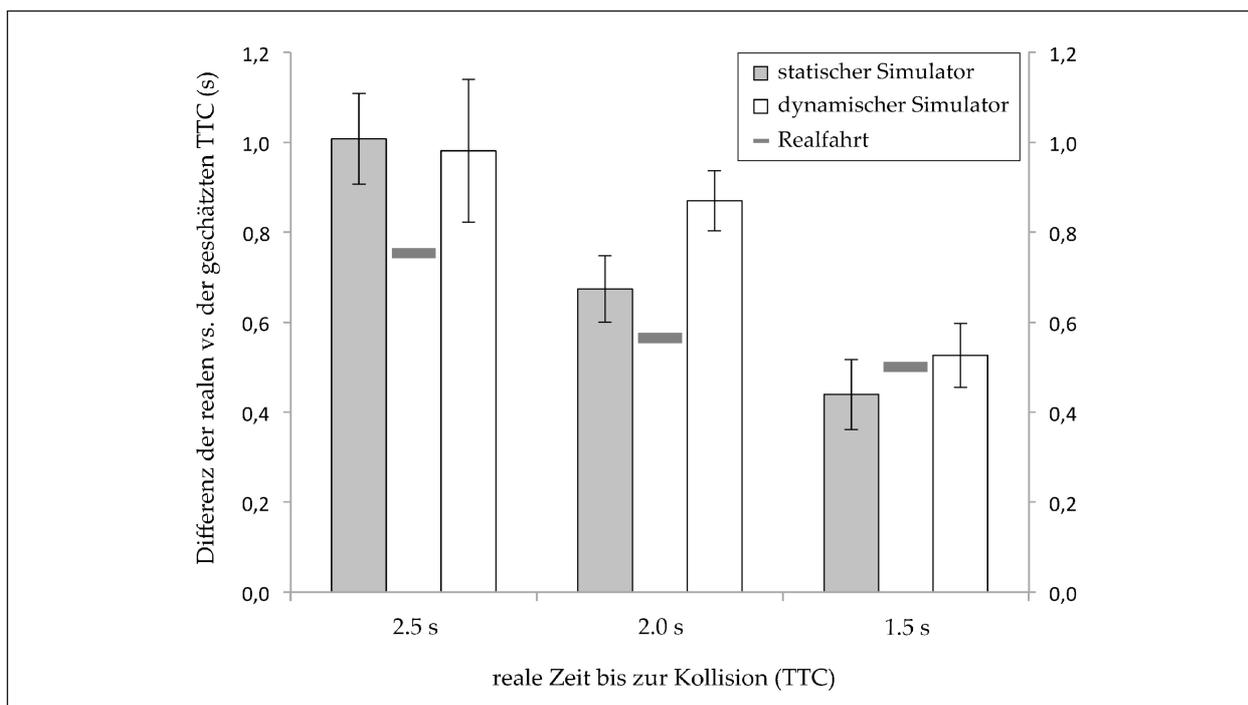


Bild 16: Mittlere Reaktionszeit der Probanden bis zum Beschleunigungsbeginn abhängig von der Beschleunigungsintensität des Vorderfahrzeugs im statischen und dynamischen Fahrsimulator sowie in der Realfahrt. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler

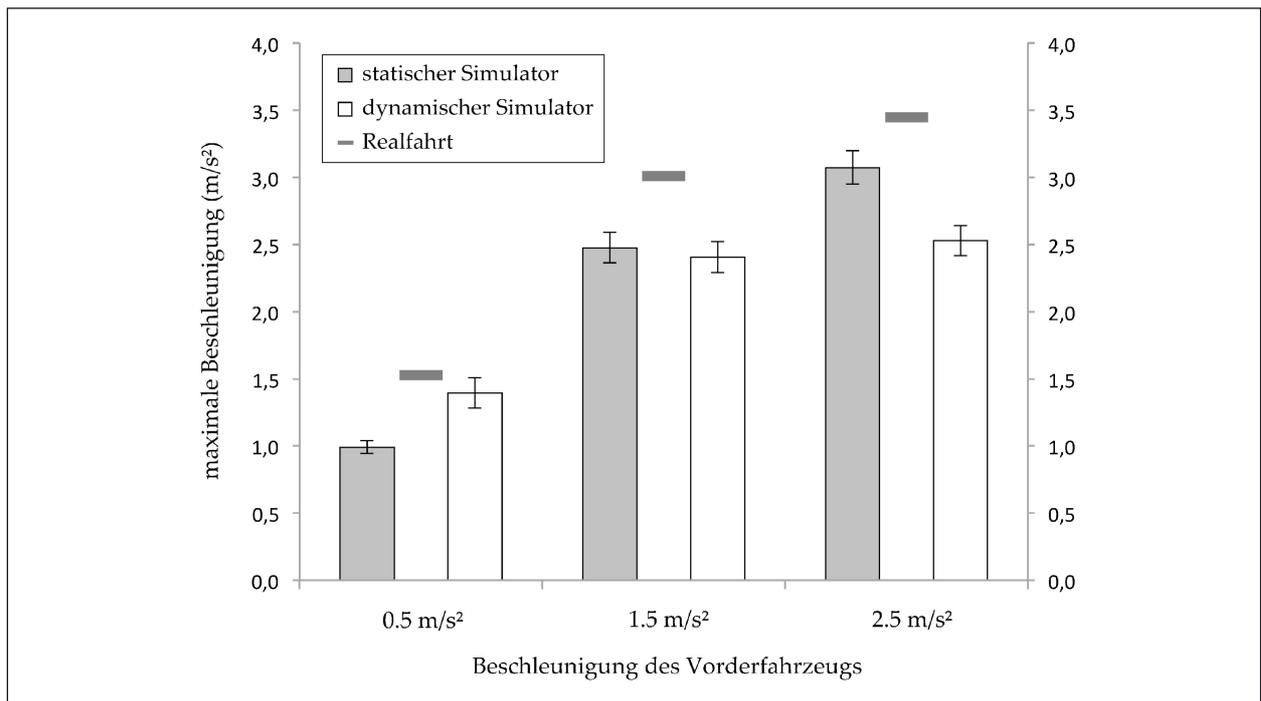


Bild 17: Mittlere maximale Beschleunigung der Probanden abhängig von der Beschleunigungsintensität des Vorderfahrzeugs im statischen und dynamischen Fahrsimulator sowie in der Realfahrt. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler

($F(1, 56) = .46, p = .50, \eta^2 = .01$). Erwartungsgemäß konnte jedoch ein signifikanter Haupteffekt des messwiederholten Faktors „Beschleunigung des Vorderfahrzeugs“ unabhängig vom getesteten Simulator zwischen den drei Intensitäten festgestellt werden ($F(2, 112) = 186,91, p < .001, \eta^2 = .77$). Post-hoc-Vergleiche auf einem Bonferroni-korrigierten α -Fehlerniveau von .017 wiesen darauf hin, dass konsistent signifikant stärker beschleunigt wurde, wenn auch das Vorderfahrzeug stärker beschleunigte ($2,5 \text{ m/s}^2 > 1,5 \text{ m/s}^2 > 0,5 \text{ m/s}^2$), für alle $p < .001$. Außerdem wurde ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen den Faktoren „Simulator“ und „Beschleunigung des Vorderfahrzeugs“ beobachtet ($F(2, 112) = 12,29, p < .001, \eta^2 = .18$). Anschließende t -Tests zeigen, dass bei einer Beschleunigung von $0,5 \text{ m/s}^2$ des Vorderfahrzeugs im dynamischen Simulator signifikant stärker beschleunigt wurde als im statischen Simulator ($t(42,75) = 2,70, p < .01, \eta^2 = .11$). Wenn das Vorderfahrzeug mit $1,5 \text{ m/s}^2$ beschleunigte, fand sich kein signifikanter Unterschied im Beschleunigungsverhalten der Probanden im statischen und dynamischen Simulator ($t(57) = -.45, p = .66, \eta^2 = .01$). Bei einer Beschleunigung von $2,5 \text{ m/s}^2$ konnte wiederum eine signifikant stärkere Beschleunigung der Probanden im statischen Simulator als im dynamischen Simulator ermittelt werden ($t(57) = -3,26, p < .01, \eta^2 = .16$).

3.5 Folgefahrt mit Verzögerung

In Bild 18 ist die mittlere Reaktionszeit der Probanden bis Bremsbeginn abhängig von der Verzögerungsintensität des Vorderfahrzeugs im statischen und dynamischen Fahrsimulator dargestellt. Die Realfahrt liefert hier ausschließlich einen Referenzwert für die Verzögerungen von $-3,0 \text{ m/s}^2$ und $-5,0 \text{ m/s}^2$, da die Bedingung $-1,0 \text{ m/s}^2$ ursprünglich, aufgrund alternativer methodischer Überlegungen, ohne Bremslichtaktivierung gefahren wurde und somit für dieses Validierungsszenario keine vergleichbare Referenz gewährleistet.

Eine 2×3 MANOVA mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor zeigte entsprechend der Erwartung keinen signifikanten Haupteffekt für den Zwischengruppenfaktor „Simulator“ ($F(1, 58) = .99, p = .33, \eta^2 = .02$). Hypothesenkonform konnte kein signifikanter Haupteffekt für den messwiederholten Faktor „Verzögerung des Vorderfahrzeugs“, unabhängig vom getesteten Simulator, zwischen den drei Verzögerungsintensitäten gefunden werden ($F(1,53, 88,56) = .77, p = .44, \eta^2 = .01$). Die Freiheitsgrade wurden nach GREENHOUSE-GEISER korrigiert mit $\epsilon = .76$. Dementsprechend reagierten die Probanden unabhängig von der Verzögerungsintensität mit vergleichbarer Wahrnehmungsgeschwindigkeit auf die Verzögerung des Vorder-

fahrzeugs. Eine Interaktion der Faktoren „Simulator“ und „Verzögerung des Vorderfahrzeugs“ konnte ebenfalls nicht beobachtet werden ($F(1,53, 88,56) = .87, p = .40, \eta^2 = .02$).

Bild 19 zeigt den mittleren minimalen Abstand der Versuchsteilnehmer zum Vorderfahrzeug in Abhängigkeit von der Verzögerungsintensität des Vorderfahrzeugs für den statischen und dynamischen

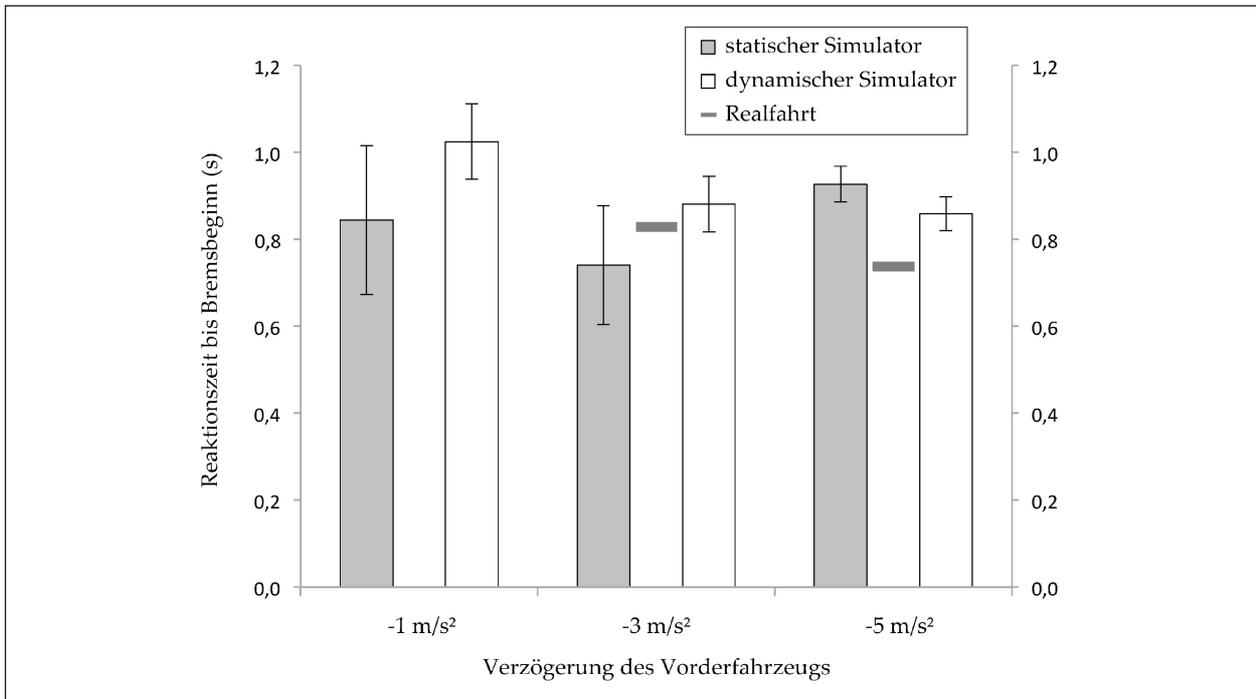


Bild 18: Mittlere Reaktionszeit der Probanden bis zum Bremsbeginn abhängig von der Verzögerungsintensität des Vorderfahrzeugs im statischen und dynamischen Fahrsimulator sowie in der Realfahrt. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler

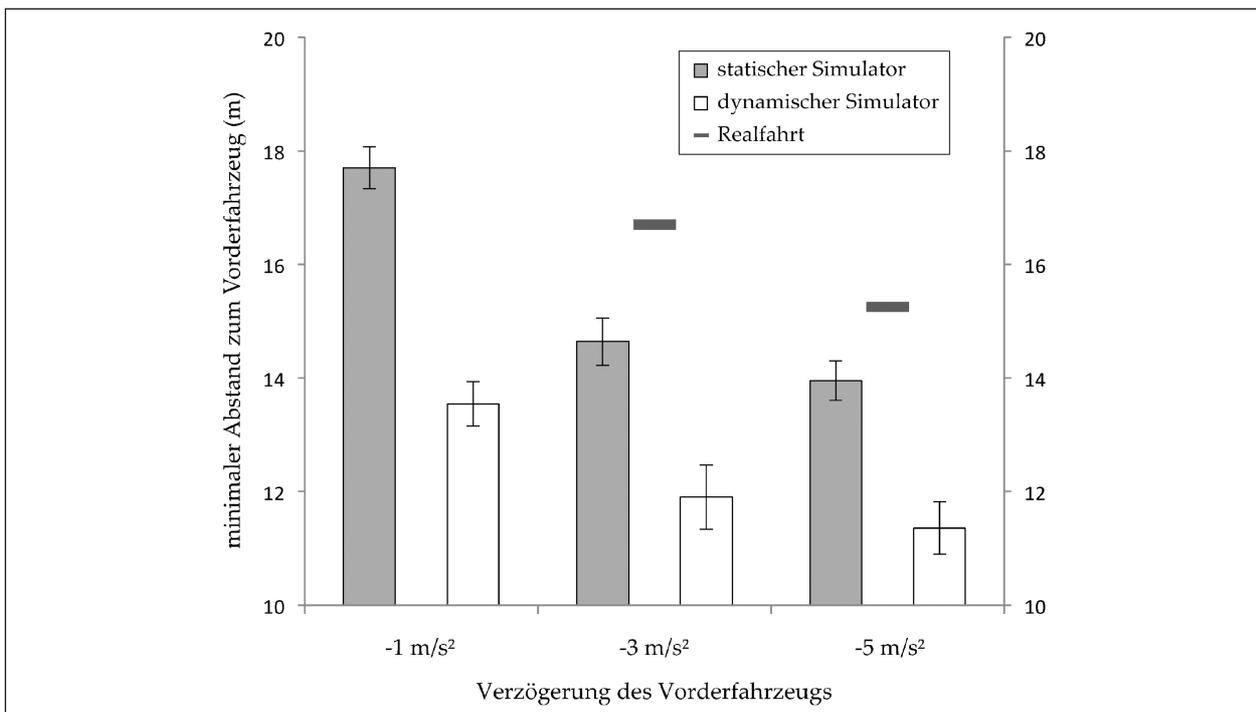


Bild 19: Mittlerer minimaler Abstand der Probanden zum Vorderfahrzeug abhängig von der Verzögerungsintensität des Vorderfahrzeugs im statischen und dynamischen Fahrsimulator sowie in der Realfahrt. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler

Fahrsimulator. Auch hier liefert die Realfahrt ausschließlich einen Referenzwert für die Verzögerungen von $-3,0 \text{ m/s}^2$ und $-5,0 \text{ m/s}^2$ aufgrund deaktivierter Bremslichter in der Bedingung $-1,0 \text{ m/s}^2$.

Eine 2×3 MANOVA mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor wies entsprechend der Hypothese einen signifikanten Haupteffekt des Zwischengruppenfaktors „Simulator“ für den minimalen Abstand zum Vorderfahrzeug auf ($F(1, 58) = 45,75, p < .001, \eta^2 = .44$). Demnach erfolgte im statischen Simulator eine intensivere Abbremsung als im dynamischen Simulator (unabhängig von der Verzögerungsintensität des Vorderfahrzeugs), wodurch ein größerer Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug eingehalten wurde. Ebenfalls konnte hypothesenkonform ein signifikanter Haupteffekt für die Verzögerungsintensität des Vorderfahrzeugs (messwiederholt) beobachtet werden ($F(2, 116) = 42,24, p < .001, \eta^2 = .42$). Anhand von Post-hoc-Tests auf einem Bonferroni-korrigierten α -Fehlerniveau von .017 wurde festgestellt, dass der Abstand zum Vorderfahrzeug bei einer Verzögerung von $-1,0 \text{ m/s}^2$ signifikant größer war als bei $-3,0 \text{ m/s}^2$ oder $-5,0 \text{ m/s}^2$ (jeweils $p < .001$). Ein signifikant größerer Abstand bei $-3,0 \text{ m/s}^2$ im Vergleich zu $-5,0 \text{ m/s}^2$ konnte allerdings nicht gemessen werden ($p = .22$).

Darüber hinaus konnte ein Interaktionseffekt zwischen den Faktoren „Simulator“ und „Verzögerung

des Vorderfahrzeugs“ zufallskritisch abgesichert werden ($F(2, 116) = 3,22, p < .05, \eta^2 = .05$). Anschließende t -Tests zeigen, dass sowohl bei einer Verzögerung von $-1,0 \text{ m/s}^2$ ($t(58) = -7,75, p < .001, \eta^2 = .51$) als auch bei $-3,0 \text{ m/s}^2$ ($t(58) = -3,89, p < .001, \eta^2 = .21$) als auch bei $-5,0 \text{ m/s}^2$ ($t(58) = -4,48, p < .001, \eta^2 = .26$) der minimal eingehaltene Abstand zum Vorderfahrzeug im statischen Simulator signifikant größer war als im dynamischen Simulator. Somit variierte die Größe des Unterschieds zwischen den Simulatoren als Funktion des Betrags der Verzögerung.

3.6 Gassendurchfahrt

In Bild 20 ist die mittlere Geschwindigkeit bei Einfahrt in die Leitbakengasse in Abhängigkeit von der Gassenbreite für den statischen und dynamischen Fahrsimulator dargestellt. Die Realfahrt liefert einen Referenzwert.

Eine 2×4 MANOVA mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor zeigte einen hypothesenkonträren Haupteffekt des Zwischengruppenfaktors „Simulator“ ($F(1, 58) = 17,77, p < .001, \eta^2 = .24$). Folglich fuhren die Probanden im dynamischen Simulator signifikant langsamer als im statischen Simulator in die Gasse ein, zunächst unabhängig von der Gassenbreite. Allerdings konnte für den messwiederholten Faktor „Gassenbreite“ entspre-

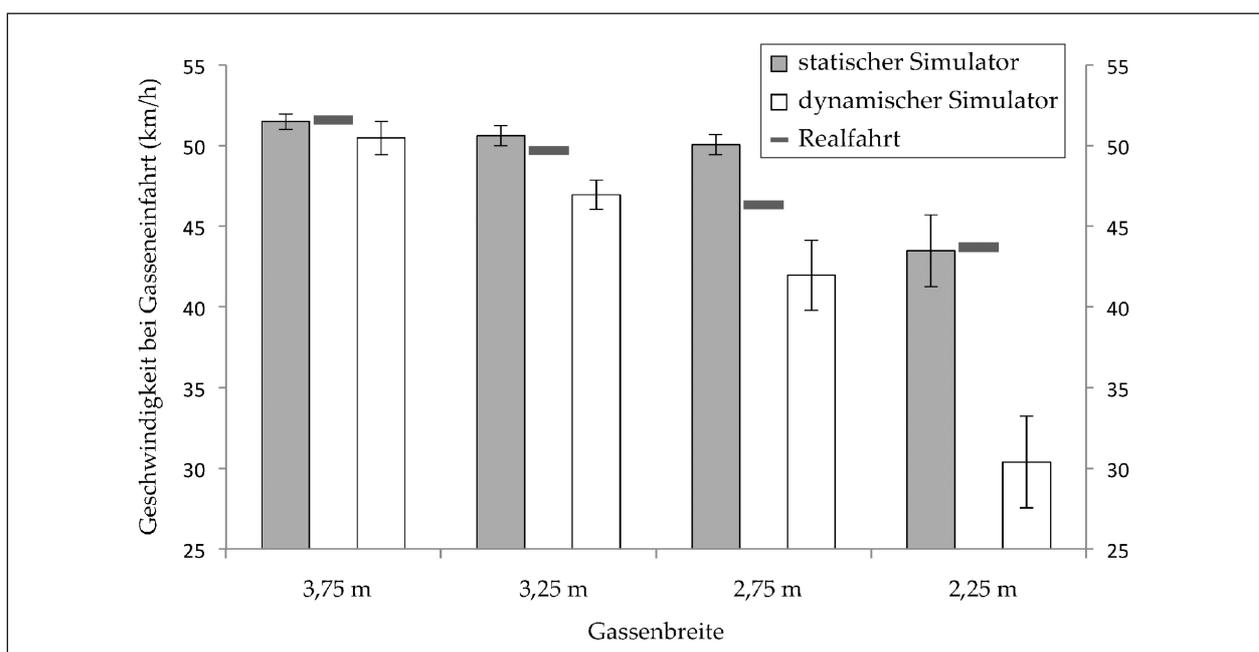


Bild 20: Mittlere Geschwindigkeit der Probanden bei Gasseneinfahrt abhängig von der Gassenbreite im statischen und dynamischen Fahrsimulator sowie in der Realfahrt. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler

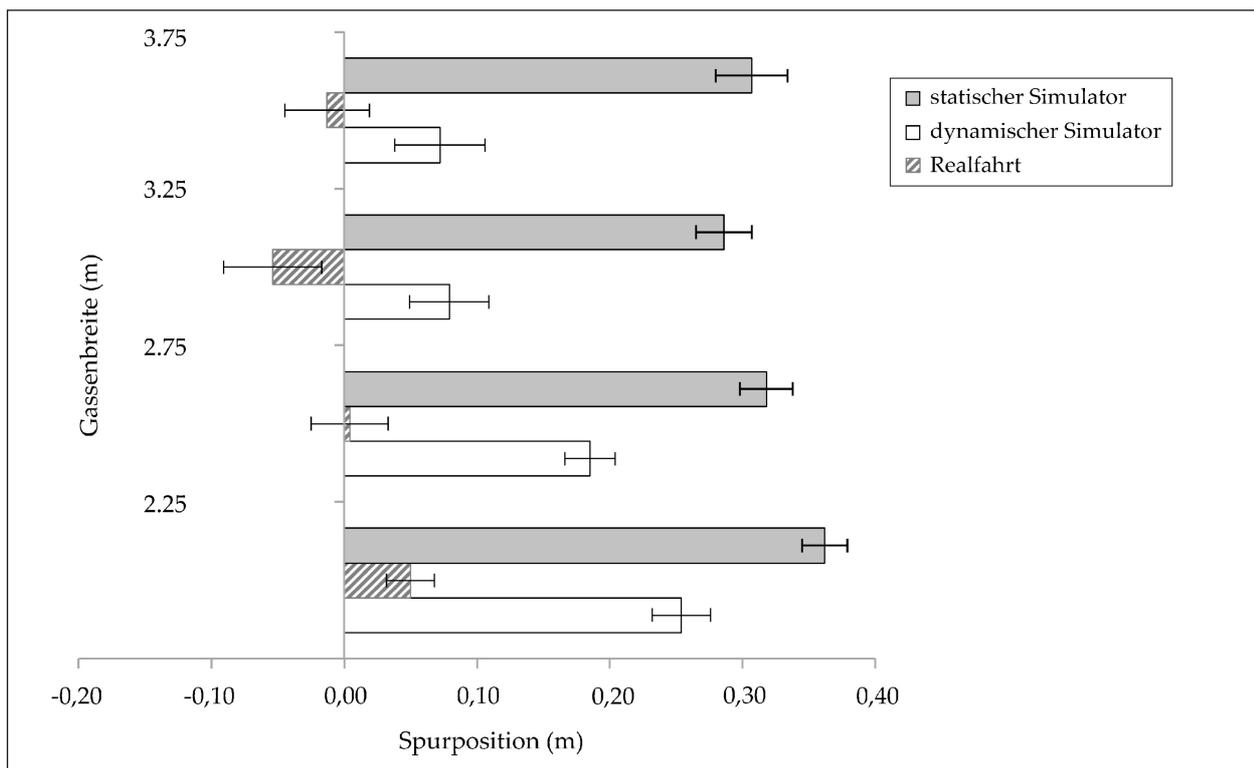


Bild 21: Mittlere Spurposition der Probanden während der Gassendurchfahrt abhängig von der Gassenbreite für den statischen und dynamischen Fahrsimulator sowie in der Realfahrt. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler

chend der Hypothese ein signifikanter Haupteffekt festgestellt werden ($F(1,58, 91,42) = 40,74$, $p < .001$, $\eta^2 = .41$). Die Freiheitsgrade wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert mit $\epsilon = .53$. Anschließende Post-hoc-Tests auf einem Bonferroni-korrigierten α -Fehlerniveau von .013 wiesen darauf hin, dass die Geschwindigkeit konsistent mit abnehmender Gassenbreite signifikant reduziert wurde ($3,75 \text{ m} > 3,25 \text{ m} > 2,75 \text{ m} > 2,25 \text{ m}$). Dabei unterschieden sich alle Gassen, bis auf die Gassenbreiten von 3,25 m und 2,75 m ($p = .02$), mit $p < .001$ voneinander.

Darüber hinaus konnte ein Interaktionseffekt zwischen den Faktoren „Simulator“ und „Gassenbreite“ ausgemacht werden ($F(1,58, 91,42) = 7,52$, $p < .01$, $\eta^2 = .12$). Auch hier wurden die Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser korrigiert mit $\epsilon = .53$. Demnach wurde im dynamischen Simulator sowohl bei einer Gassenbreite von 2,25 m ($t(54,75) = -3,63$, $p < .001$, $\eta^2 = .19$) als auch bei 2,75 m ($t(33,68) = -3,60$, $p < .01$, $\eta^2 = .18$) als auch bei 3,25 m ($t(58) = -3,33$, $p < .01$, $\eta^2 = .16$) die Geschwindigkeit signifikant im Vergleich zum statischen Simulator reduziert. Einzig bei einer Gassenbreite von 3,75 m ($t(40,84) = -.88$, $p = .38$, $\eta^2 = .01$) konnte keine signifikante Geschwindigkeitsreduktion im dynamischen Simulator beobachtet werden.

Bild 21 zeigt die mittlere Spurposition in der Gasse in Abhängigkeit von der Gassenbreite für beide Fahrsimulatoren sowie für die Realfahrt. In diesem Fall ist die Spurposition auf der Abszisse (X-Achse), die Gassenbreite auf der Ordinate (Y-Achse) abgetragen, um den Spurversatz in der Gasse zwischen linken und rechten Leitbaken zu illustrieren. Bei einer Spurposition von Null Metern wird die Gasse mittig durchfahren.

Als zusätzliche Darstellung des Spurversatzes empfehlen sich Boxplots (siehe Bild 22), die sowohl den medialen Spurversatz als auch die Streuung des Versatzes erfassen. Die Box begrenzt dabei das linke und rechte Quartil, die Antennen bilden das linke und rechte Maximum des Spurversatzes ab. Auf diese Weise lässt sich erkennen, ob und wie stark die Spurposition nach links oder rechts zwischen den Leitbaken variierte.

Eine 2×4 MANOVA mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor wies entsprechend der Hypothese auf einen signifikanten Unterschied in der Spurposition zwischen statischem und dynamischem Simulator hin ($F(1, 54) = 38,36$, $p < .001$, $\eta^2 = .42$). Unabhängig vom getesteten Simulator

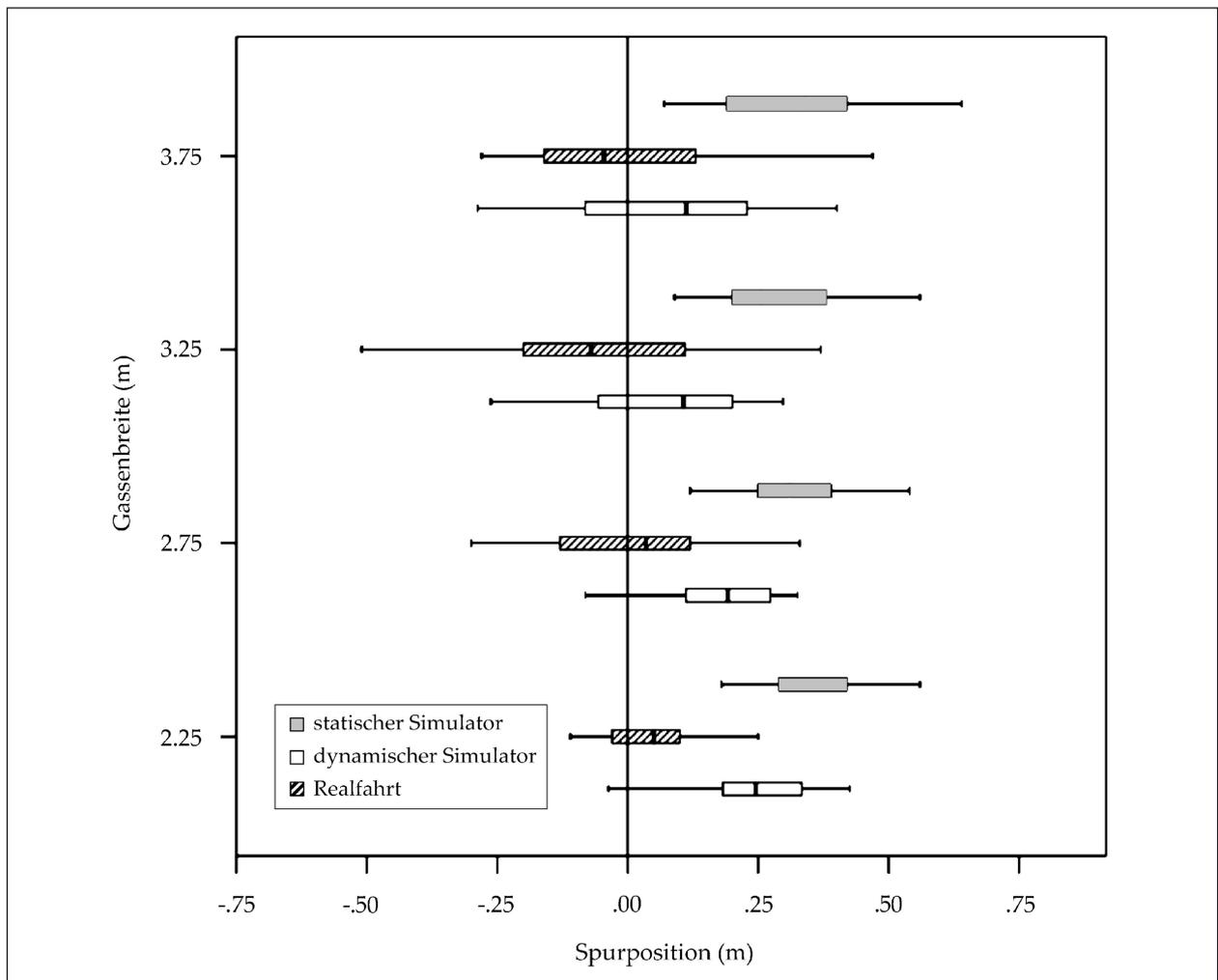


Bild 22: Boxplots für die Spurposition der Probanden während der Gassendurchfahrt abhängig von der Gassenbreite für den statischen und dynamischen Fahrsimulator sowie in der Realfahrt

zeigte sich entgegen der Erwartung ein signifikanter Haupteffekt der Gassenbreite auf die Spurposition ($F(2,54, 137,21) = 17,11, p < .001, \eta^2 = .24$). Die Freiheitsgrade wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert mit $\epsilon = .85$. Dementsprechend wurde mit abnehmender Breite der Gasse eine weiter nach rechts versetzte Spur gehalten. Post-hoc-Vergleiche auf einem Bonferroni-korrigierten α -Fehlerniveau von .013 wiesen bei der geringsten Breite von 2,25 m auf einen signifikant größeren Rechtsversatz als bei allen anderen Breiten hin (für alle $p < .001$). Des Weiteren unterschied sich die Spurposition von 2,75 m signifikant von 3,25 m ($p < .01$), jedoch nicht von 3,75 m ($p = .07$). Zwischen der Breite von 3,25 m und 3,75 m konnte kein signifikanter Unterschied im Spurversatz festgestellt werden ($p = 1.00$).

Die Interaktion zwischen den Faktoren „Simulator“ und „Gassenbreite“ konnte zufallskritisch abgesi-

chert werden ($F(2,54, 137,21) = 3,45, p < .05, \eta^2 = .06$). Anschließende t -Tests zeigen entsprechend der Hypothese, dass bei allen vier Gassenbreiten im statischen Simulator eine weiter nach rechts versetzte Spur gefahren wurde, als im dynamischen Simulator. Für 2,25 m: $t(54) = -3,96, p < .001, \eta^2 = .23$, für 2,75 m: $t(58) = -4,85, p < .001, \eta^2 = .29$, für 3,25 m: $t(58) = -5,75, p < .001, \eta^2 = .36$ und für 3,75 m: $t(58) = -5,44, p < .001, \eta^2 = .34$. Somit variierte die Größe des Unterschieds zwischen den Simulatoren im Spurversatz als Funktion der Gassenbreite.

4 Diskussion

Ziel der Studie sollte es sein, Validitätsunterschiede zwischen einem statischen und einem dynamischen Fahrsimulator aufzuklären, indem das Verhalten der Versuchsteilnehmer in grundlegenden

Fahrszenarien experimentell untersucht wurde. Um Anhaltspunkte hinsichtlich der relativen Validität zur Realität aufzuzeigen, wurden zudem im Rahmen der Studie die Referenzwerte der Realfahrt deskriptiv mit den Messwerten aus den Fahrsimulatoren verglichen.

Zunächst sollen die Ergebnisse der einzelnen Validierungsszenarien unabhängig voneinander analysiert und diskutiert werden. Hierfür bietet Tabelle 2 eine Übersicht aller Haupt- und Interaktionseffekte aufgeteilt nach jeweiligem Szenario. Anschließend werden die Befunde ganzheitlich vor dem Hintergrund der Effizienz eines zusätzlichen Bewegungssystems im dynamischen Fahrsimulator bewertet. Abschließend sollen die Grenzen der Studie aufgezeigt und Ausblicke auf anschließende Untersuchungsintentionen gegeben werden.

Im Szenario „Abstand herstellen“ folgten die Probanden jeweils einem vorausfahrenden Fahrzeug, wobei sie instruiert wurden, einen für sich persönlich „harmlosen“, „unangenehmen“ oder „gefährlichen“ Abstand zum Fahrzeug herzustellen. Es konnte gezeigt werden, dass der Abstand zum Vorderfahrzeug mit zunehmender subjektiver Kritikalität signifikant verringert wurde, und zwar sowohl im statischen als auch im dynamischen Simulator (vgl. Bild 13). Folglich ist davon auszugehen, dass auch in virtuellen Umgebungen Abstände verschiedener Kritikalität differenziert wahrgenommen werden können. Da entsprechend der Hypothese kein signifikanter Unterschied zwischen den eingestellten Abständen im statischen und dynamischen Simula-

tor beobachtet werden konnte, scheint der zusätzliche Beitrag des Bewegungssystems irrelevant für eine subjektiv adäquate Abstandsherstellung in einer simulierten Umgebung zu sein. Schließlich treten in Folgefahrten mit einem konstanten Abstand keine dynamischen Richtungs- oder Geschwindigkeitsveränderungen auf, die ursächlich für einen möglichen Redundanzgewinn während der Fahraufgabe sein könnten.

Betrachtet man die Referenzwerte der Realfahrt, so wird für einen subjektiv „harmlosen“ Abstand in beiden Simulationsumgebungen ein um ca. zehn Meter größerer Abstand zum Vorderfahrzeug gewählt als in der Realität. Eine Erklärung für diesen Wahrnehmungsunterschied könnte die Wirkungsweise von Tiefenkriterien liefern. Falls die relative Größe des vorausfahrenden Fahrzeugs in ca. 25 m Entfernung in der Simulation nicht der realen relativen Größe in ca. 25 m Entfernung entspricht (vgl. STAM, 2013), kann der Abstand in der virtuellen Umgebung unterschätzt werden, wodurch ein größerer Abstand auf Instruktion eines „harmlosen“ Abstands eingestellt wird. Des Weiteren ist der Detaillierungsgrad der Darstellung des vorausfahrenden Fahrzeugs in ca. 25 m Entfernung durch die maximale räumliche Auflösung der Projektion beschränkt und wird der menschlichen räumlichen Auflösung nicht gerecht (siehe Beispielrechnung in Kapitel 1.2.2). Die subjektiven Kritikalitäten eines „unangenehmen“ und „gefährlichen“ Abstands konnten hingegen tendenziell gleich gut in der simulierten und realen Umgebung hergestellt werden.

Validierungsszenario	Haupteffekt statisch vs. dynamisch*	Haupteffekt messwiederholter Faktor*	Interaktionseffekt*
Abstand herstellen	n. s.	$p < .001$, $\eta^2 = .68$	n. s.
Abstand schätzen	n. s.	$p < .001$, $\eta^2 = .85$	n. s.
Okklusionsversuch	n. s.	$p < .001$, $\eta^2 = .24$	n. s.
Folgefahrt Beschleunigung – Reaktionszeit	$p < .001$, $\eta^2 = .40$	$p < .001$, $\eta^2 = .41$	$p < .001$, $\eta^2 = .29$
Folgefahrt Beschleunigung – max. Beschleunigung	n. s.	$p < .001$, $\eta^2 = .77$	$p < .001$, $\eta^2 = .18$
Folgefahrt Verzögerung – Reaktionszeit	n. s.	n. s.	n. s.
Folgefahrt Verzögerung – min. Fahrzeugabstand	$p < .001$, $\eta^2 = .44$	$p < .001$, $\eta^2 = .42$	$p < .05$, $\eta^2 = .05$
Gassendurchfahrt – Geschwindigkeit	$p < .001$, $\eta^2 = .24$	$p < .001$, $\eta^2 = .41$	$p < .01$, $\eta^2 = .12$
Gassendurchfahrt – Spurposition	$p < .001$, $\eta^2 = .42$	$p < .001$, $\eta^2 = .24$	$p < .05$, $\eta^2 = .06$

* Bemerkung: Die vollständige Ergebnisdarstellung aller F -Werte inklusive Freiheitsgrade sowie aller p -Werte und Effektstärken bei nicht signifikanten Vergleichen finden sich unter Kapitel 3 aufgeteilt nach jeweiligem Szenario

Tab. 2: Haupt- und Interaktionseffekte aller Validierungsszenarien

Das Szenario „Abstand schätzen“ verfolgt den umgekehrten Ansatz zum Szenario „Abstand herstellen“, indem ein durch die Simulation vorgegebener Abstand zum Vorderfahrzeug entsprechend seiner Kritikalität auf der Subjektiven Bewertungsskala (SBS) eingeschätzt wurde. Daher beanspruchen beide Szenarien die Abstandsherstellung und -schätzung gegeneinander abzusichern: Ein gefährlicher Zeitabstand von 0,75 s wurde im Mittel signifikant kritischer bewertet als ein unangenehmer Zeitabstand von 1,50 s, bzw. wurden 1,50 s kritischer bewertet als ein harmloser Zeitabstand von 2,25 s (vgl. Bild 14). Dieses Resultat gilt in gleichem Maße für den statischen wie den dynamischen Simulator, wobei auch hier keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Prüfumgebungen festzustellen sind. Analog zum Szenario „Abstand herstellen“ profitiert der Fahrer im dynamischen Simulator nicht vom zusätzlichen Bewegungssystem. In Bezug zur Realfahrt verdeutlicht der Haupteffekt des Zeitabstands zum Vorderfahrzeug, dass alle Zeitabstände in den simulierten Prüfumgebungen tendenziell gefährlicher wahrgenommen werden als in der Realität. Vor dem Hintergrund der Resultate von GODLEY et al. (2002), KONDOH et al. (2008) oder TÖRNROS (1998) war davon auszugehen, dass die Probanden in simulierten Umgebungen generell kleinere Abstände halten oder mit höherer Geschwindigkeit fahren als in der Realität. Dennoch sollte an dieser Stelle auf die recht geringen Unterschiede von lediglich ca. 0,5 Skaleneinheiten zwischen Realität und Simulation verwiesen werden. Die Ursache dieses Widerspruchs – wahrnehmungsbedingt oder auf Risikobereitschaft der Fahrer zurückzuführen – vermag die vorliegende Studie nicht aufzuklären.

Neben den Szenarien „Abstand herstellen“ und „Abstand schätzen“, diente auch der Okklusionsversuch zur Überprüfung der Hypothese, dass die Wahrnehmung von Abständen in Fahrsimulatoren keiner zusätzlichen Bewegungsinformation bedarf (vgl. Bild 15). Die Tatsache, dass zwischen statischem und dynamischem Simulator keine Unterschiede für die Differenz der realen im Vergleich zur geschätzten Zeit bis zur Kollision (TTC) gefunden wurden, rechtfertigt die Vernachlässigung des Informationsbeitrags durch Bewegungsnachbildung bei Abstandswahrnehmung in virtuellen Umgebungen. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass auch in simulierten Testumgebungen kritischere TTCs als gefährlicher wahrgenommen wurden als unkritischere und zwar unabhängig vom untersuchten Simulator,

da größere TTC-Differenzen (real – geschätzt) bei längerer realen Zeit bis zur Kollision beobachtet wurden. Das Optimum der Differenz zwischen realer und geschätzter TTC würde für alle Kritikalitäten normalerweise bei null Sekunden liegen. Menschen tendieren allerdings dazu, die Zeit bis zur Kollision zu unterschätzen (THARANATHAN & DELUCIA, 2006; van WINSUM, 1999), damit auf jeden Fall eine Kollision mit einem Objekt oder Fahrzeug vermieden wird. Diese Verzerrung ist in den Simulationsumgebungen deskriptiv größer als in der Realität, womöglich umso größer, je länger die reale Zeit bis zur Kollision beträgt. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist davon auszugehen, dass simulationsgeschuldete visuelle Wahrnehmungseinbußen für diese Verzerrung verantwortlich sind. Hier lässt sich nun spekulieren, welche Tiefenkriterien durch die Reduktion ihres Informationsbeitrags als Ursache in Frage kommen. Disparitätsinformation und Konvergenz- bzw. Akkomodation spielen eine wesentliche Rolle bei Distanzwahrnehmung bis ungefähr zehn Metern (CUTTING & VISHTON, 1995; vgl. Kapitel 1.2.3), dem kritischen Bereich für menschliche Kollisionsvermeidung. Obwohl die Wirkungsweise dieser Tiefenkriterien mit starken Restriktionen im Zuge der Projektion verbunden ist, sind sie als Ursache für die Verzerrung des geschätzten Kollisionszeitpunkts in den Simulationsumgebungen auszuschließen: Selbst bei der geringsten untersuchten TTC von 1,5 s bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h beträgt der Abstand bis zur Kollision mehr als 20 m. Demnach wäre alternativ zu diskutieren, ob beispielsweise die relative Größe des stehenden Fahrzeugs verzerrt über die Simulationsprojektion wiedergegeben wird, wie bereits STAM (2013) beobachtete. Ist von einer zu hohen relativen Größe in den hier untersuchten virtuellen Umgebungen im Vergleich zur Realität auszugehen, könnte dies eine Unterschätzung der Zeit bis zur Kollision mit sich bringen.

Für das Folgefahrtszenario mit Beschleunigung des Vorderfahrzeugs wurde erwartet, dass die Reaktionszeit der Probanden bis zu ihrem Beschleunigungsbeginn zwar unabhängig vom untersuchten Simulator, nicht aber von der Beschleunigungsintensität des Vorderfahrzeugs sein sollte. Zunächst konnten vergleichbare Reaktionszeiten für die Beschleunigungsintensitäten von 1,5 m/s² und 2,5 m/s² unabhängig von der Prüfumgebung ermittelt werden (vgl. Bild 16). Da sich die relative Größe des Vorderfahrzeugs bei 0,5 m/s² nur sehr langsam

veränderte, wurde diese Beschleunigungsintensität, entsprechend der Erwartung, signifikant später wahrgenommen als $1,5 \text{ m/s}^2$ und $2,5 \text{ m/s}^2$. Dass jedoch die Reaktionszeit im dynamischen Fahrsimulator zwischen einer Sekunde bei Beschleunigung von $2,5 \text{ m/s}^2$ und ca. zweieinhalb Sekunden bei einer Beschleunigung von $0,5 \text{ m/s}^2$ im Gegensatz zum statischen Fahrsimulator erhöht ist, wurde so nicht erwartet. Anhand der Realfahrt-Referenz erkennt man für alle Beschleunigungsintensitäten, dass die Reaktionszeiten im statischen Fahrsimulator deskriptiv deutlich näher an der Realität liegen als die Reaktionszeiten im dynamischen Simulator. Die Ursache für diesen eklatanten Unterschied ist nur schwierig zu diskutieren: Primär unterscheiden sich statischer und dynamischer Fahrsimulator in der Bewegungsnachbildung. Allerdings ist der Hinweis auf Beschleunigung des Vorderfahrzeugs rein visueller Natur, ohne dass eine vestibuläre Rückmeldung involviert wäre. Folglich sehen die Probanden lediglich, dass sich das Fahrzeug vor ihnen entfernt. Dieser Hinweis sollte sowohl im statischen als auch im dynamischen Fahrsimulator äquivalent abgebildet werden. Demzufolge muss der Grund für die erhöhte Reaktionszeit im dynamischen Simulator in der visuellen Darstellung gesucht werden. Da die räumliche Auflösung der Projektion im statischen und dynamischen Simulator weitestgehend identisch ist, könnte eine mögliche Fehlerquelle beispielsweise in einer zu geringen zeitlichen Auflösung im dynamischen Simulator zu finden sein.

Hinsichtlich der abhängigen Variable „maximale Beschleunigung“ zeigte sich im Szenario „Folgefahrt mit Beschleunigung“ ein recht interessantes Ergebnismuster. Zunächst wurde festgestellt, dass der Haupteffekt der Beschleunigung des Vorderfahrzeugs zufallskritisch abgesichert werden konnte. Demnach beschleunigten die Probanden unabhängig von der Prüfumgebung signifikant stärker, wenn auch das Vorderfahrzeug stärker beschleunigte (vgl. Bild 17). Dieser Effekt wurde dahingehend erwartet, als dass eine proportionale Eigenbeschleunigung zwangsweise notwendig ist, um den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug konstant zu halten. Dennoch blieben die Probanden bei allen drei Beschleunigungsintensitäten unter der Realfahrtreferenz zurück, die annähernd exponentiell zwischen den drei Intensitäten ansteigt. Abhängig von der Beschleunigungsintensität des Vorderfahrzeugs zeigten sich jedoch inkonsistente Befunde für die maximale Beschleunigung im statischen und

dynamischen Fahrsimulator. Bei $0,5 \text{ m/s}^2$ konnte entgegen der Hypothese eine signifikant höhere maximale Beschleunigung im dynamischen als im statischen Simulator nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis ist in Zusammenhang mit der Reaktionszeit auf Beschleunigungsbeginn zu sehen. Demnach müssen die Probanden im dynamischen Fahrsimulator ihre verzögerte Reaktion mit stärkerer Beschleunigung kompensieren, um den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug konstant zu halten. Mit zunehmender Beschleunigungsintensität des Vorderfahrzeugs (bei $1,5 \text{ m/s}^2$) ist die maximale Eigenbeschleunigung im dynamischen Simulator nun auf vergleichbarem Level wie die maximale Eigenbeschleunigung im statischen Simulator. Obwohl die verzögerte Reaktionszeit auch hier aufgeholt werden müsste, halten sich die Probanden im dynamischen Fahrsimulator in ihrer Beschleunigungsstärke zurück. Ein möglicher anzunehmender Grund könnte die aversiv empfundene Bewegung (Neigung) des dynamischen Simulators sein. Diese Interpretation ist vor allem auf die Bedingung mit $2,5 \text{ m/s}^2$ zu übertragen, bei der nun im statischen Simulator signifikant stärker beschleunigt wird als im dynamischen. Hier ist sogar ein Deckeneffekt zu beobachten: Die maximal mögliche Beschleunigung im statischen Simulator lag bei $3,0 \text{ m/s}^2$, die hier von den meisten Probanden verwendet wurde. Dementsprechend hätte der Unterschied der Maximalbeschleunigung zwischen statischem und dynamischem Simulator bei $2,5 \text{ m/s}^2$ noch größer ausfallen können, weil die Probanden im statischen Fahrsimulator gerne noch stärker beschleunigt hätten als es die Simulation überhaupt zugelassen hatte. Zusammenfassend ist folglich, entgegen der Erwartung, kein Redundanzgewinn durch zusätzlich nachempfundene Bewegung im dynamischen Simulator zu beobachten, sondern vielmehr eine zunehmende Aversion bei großen Neigebewegungen zu erkennen. Unter Umständen vermeiden viele Probanden große Bewegungen des dynamischen Simulators, um dem Auftreten der Simulatorkrankheit entgegenzuwirken. Auf diese Weise kann, entsprechend der Cue-Conflict-Theorie, die konfliktbehaftete vestibuläre Information relativ zum visuellen Input reduziert werden.

Die Ergebnisse des Folgefahrszenarios mit Verzögerung zeigen, dass hypothesenkonform kein signifikanter Haupteffekt der Verzögerungsintensität des Vorderfahrzeugs auf die Reaktionszeit der Probanden bis Bremsbeginn gefunden wurde (vgl. Bild 18).

Demnach bemerkten die Versuchsteilnehmer sowohl im statischen als auch im dynamischen Fahrsimulator die Verzögerung des Vorderfahrzeugs vergleichbar schnell. Außerdem unterschieden sich statischer und dynamischer Simulator nicht hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeit der Probanden. Dieses Resultat ist insofern plausibel, als die Probanden ausschließlich anhand der Bremslichter des Vorderfahrzeugs (visueller Hinweis) auf die bevorstehende Verzögerung schließen konnten und keinen zusätzlichen vestibulären Input zur Verfügung hatten. Darüber hinaus leuchteten die Bremslichter bei einer geringen Verzögerung des Vorderfahrzeugs in derselben Intensität und zum selben Zeitpunkt auf wie bei einer starken Verzögerung des Vorderfahrzeugs, weshalb entsprechend der Erwartung kein Reaktionsvorteil bei starken Verzögerungen beobachtet wurde. Zieht man die Referenzwerte aus der Realfahrt hinzu, so lassen sich deskriptiv keine bedeutsamen Unterschiede zwischen Reaktionsgeschwindigkeit in Realität und Simulation feststellen. Dieser Befund steht im Einklang mit den Ergebnissen von HOFFMAN et al. (2002).

In Bild 19 lässt sich aus der abhängigen Variable „minimaler Abstand zum Vorderfahrzeug“ auf die Bremsintensität der Probanden schließen: Je größer der minimale Abstand zum Vorderfahrzeug war, desto stärker bremsten die Versuchsteilnehmer in der jeweiligen Verzögerungsbedingung. Zunächst fällt auf, dass sich die Bremsintensität in allen Prüfumgebungen proportional zur Bremsintensität des Vorderfahrzeugs verhält. Folglich wurde bei einer Verzögerungsintensität von -5 m/s^2 signifikant stärker abgebremst, um einen konstanten Abstand zu halten als beispielsweise bei -1 m/s^2 . Dabei ist festzustellen, dass im statischen Simulator signifikant stärker abgebremst wurde als im dynamischen Simulator, und zwar über alle Verzögerungsintensitäten hinweg, wie die Interaktion zwischen Prüfumgebung und Verzögerungsintensität zeigt. Dieses Resultat unterstützt die Hypothese, dass Probanden im dynamischen Fahrsimulator vom Redundanzgewinn durch zusätzliche Bewegungsinformation profitieren und ihre Bremsintensität entsprechend präziser regulieren bzw. dosieren können als im statischen Fahrsimulator.

Vergleicht man nun auf deskriptiver Ebene den mittleren minimalen Abstand zum Vorderfahrzeug zwischen Simulation und Realfahrt, so ist eine deutlich intensivere Abbremsung in der Realität als in der virtuellen Umgebung abzuleiten, da in der Realität

tendenziell ein größerer Abstand zum Vorderfahrzeug gehalten wird. Obwohl für eine Verzögerung von -1 m/s^2 kein Referenzwert im Realfahrzeug erhoben wurde, ist unter Berücksichtigung der Referenzwerte von -3 m/s^2 und -5 m/s^2 nicht davon auszugehen, dass entsprechend der Befunde von HOFFMAN et al. (2002) nur bei starken Bremsintensitäten eine Vergleichbarkeit von dynamischem Fahrsimulator und Realfahrt gegeben ist. Vielmehr ist hier generell von einer schlechten relativen Validität zwischen den Simulationsumgebungen und der Realität auszugehen, wodurch ebenfalls die Ergebnisse von McGEHEE et al. (2000) keine Replikation erfahren. Hier ist zu diskutieren, ob ggf. eine differenzierte Risikowahrnehmung zwischen Virtualität und Realität während einer Bremsung einen größeren Sicherheitsabstand im Realfahrzeug mit sich bringt. Aus diesem Grund kann die relative Validität beider Simulatoren nur eingeschränkt miteinander verglichen werden: Einerseits liegen die Messwerte aus dem statischen Fahrsimulator tendenziell näher an der Realfahrtreferenz (mit zusätzlichem Sicherheitsabstand), andererseits scheint die zusätzliche kinetische Komponente im Verzögerungsszenario valider über die Bremsrückmeldung im dynamischen als im statischen Fahrsimulator abgebildet zu werden.

Bei der Untersuchung des Querabstands in der „Gassendurchfahrt“ wurde sowohl die Geschwindigkeit bei Einfahrt in die Gasse als auch die Spurposition während der Gassendurchfahrt als abhängige Variable erhoben. Zunächst konnte hypothesenkonform nachgewiesen werden, dass die Geschwindigkeit mit abnehmender Gassenbreite signifikant (über alle Gassen hinweg) reduziert wurde (vgl. Bild 20). Dieser Haupteffekt lässt sich gut mithilfe des Geschwindigkeits-Genauigkeits-Austauschs erklären, wonach die Durchfahrt einer sehr engen Gasse ohne Berührung der Gassenbegrenzung eine verminderte Geschwindigkeit erfordert. Sowohl für den statischen als auch für den dynamischen Fahrsimulator konnte dieses Ergebnismuster gefunden werden, wobei im statischen Simulator eine signifikant höhere Geschwindigkeit im Vergleich zum dynamischen ermittelt wurde. Dieses Ergebnis gilt für alle Gassenbreiten, mit Ausnahme von der breitesten Gasse (3,75 m). Ursprünglich wurde jedoch, entsprechend der Befunde von REYMOND et al. (2001), eine höhere Geschwindigkeit im dynamischen als im statischen Simulator bei Beginn der Gasse erwartet. Eine mögliche Erklärung dieses Widerspruchs ist unter

Umständen in der Gestaltung der Fahraufgabe in der vorliegenden Studie zu finden. Im Gegensatz zur Untersuchung von REYMOND et al. (2001), die die Fahrgeschwindigkeit auf einem (simulierten) Teststreckenabschnitt erhoben, wurde hier die Fahrgeschwindigkeit vor Einfahrt in eine Verengung gemessen. In diesem Fall könnte davon ausgegangen werden, dass die laterale Bewegung im dynamischen Simulator auf engstem Raum nicht valide die reale Fahrzeugbewegung abbildet, sondern eher in Konflikt mit der visuellen seitlichen Abstandswahrnehmung steht – unter Umständen treten hierbei Symptome der Simulatorkrankheit in Erscheinung. So könnten die getesteten Probanden ggf. durch unpräzise Bewegungsabläufe bei Anfahrt der Gasse verunsichert worden sein, wodurch sie ihre Geschwindigkeit reduzieren mussten. Diese Erklärungsmöglichkeit kann von den Realfahrtreferenzwerten gestützt werden: Hier zeigt sich, dass der statische Simulator tendenziell näher an der realen Fahrgeschwindigkeit liegt und somit augenscheinlich ein valideres Abbild der Realität erlaubt als der dynamische Fahrsimulator. Allerdings müssen im Folgenden, für eine umfassende Interpretation der Realitätsnähe beider Simulatoren, auch die Ergebnisse der Spurpositionsmessung hinterfragt werden.

Ausgehend von den zuvor aufgestellten Hypothesen sollte die Breite der jeweiligen Gasse in keiner Prüfumgebung eine Auswirkung auf die Spurposition in der Gasse haben. Dennoch zeigte sich, dass mit abnehmender Gassenbreite eine signifikant nach rechts versetzte Spur gehalten wurde (vgl. Bild 21 und 22). Über die Ursache dieses konsistenten Phänomens lässt sich nur spekulieren: Möglicherweise tendieren Fahrer bei Fahrbahnverengungen in virtuellen Umgebungen dazu, ihre eigene Position (linker Sitz) in der Fahrerkabine/im Mock-Up mittig zur Fahrbahn auszurichten. Als Konsequenz verlagern sie ihre Spurposition weiter nach rechts. Dennoch ist dieses Phänomen nicht in der Realfahrtreferenz aufzufinden, wodurch auch die Konstruktion der jeweiligen Fahrerkabine/des Mock-Ups relativ zur Projektionsfläche eine anzunehmende Fehlerquelle für Wahrnehmungsverzerrungen hinsichtlich des Querabstands birgt. Generell kann das Resultat des lateralen Versatzes zumindest im Licht der Befunde von TÖRNROS (1998) für einen dynamischen Fahrsimulator gesehen werden. Entsprechend der Hypothese fällt dieser Rechtsversatz jedoch im statischen Simulator signifikant stärker aus als im dynamischen.

Zieht man also die Spurposition zur Bewertung der Realitätsnähe beider Simulatoren hinzu, zeigt sich, dass die Probanden im statischen Fahrsimulator zwar mit höherer (realitätsnäherer) Geschwindigkeit in die Gasse einfahren, jedoch nur, weil sie ihren seitlichen Abstand falsch einschätzen. In diesem Fall ist dem dynamischen Fahrsimulator hier eine validere Realitätsabbildung zu attestieren als dem statischen. Dieses Resultat kann zwar den von ALM (1996) beschriebenen Effekt replizieren, wirft trotzdem aber die Frage auf, warum ohne Einfluss eines Bewegungssystems die Gasse noch weiter rechts durchfahren wird als mit Bewegungseinfluss. Letztendlich sollte auch hier die Lösung in der simulatortypischen Konstruktion zu finden sein. Vor allem im statischen Fahrsimulator kann vom Fahrersitz des Mock-Ups aus die rechtsseitige Fahrzeugbegrenzung nur erahnt werden. Dies gelingt aufgrund der vollständigen Fahrzeugkabine im dynamischen Simulator deutlich besser. Falls sich zu dieser Fehlerquelle noch Ungenauigkeiten in der Positionierung des statischen Mock-Ups relativ zur Projektionsfläche ungünstig addieren, und ggf. die Kalibrierung der Fahrzeugzentrierung minimal fehlerbehaftet ist, kann dies einen ausgeprägten Rechtsversatz der Spurposition hervorrufen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der hier untersuchte statische und dynamische Fahrsimulator vergleichbare Ergebnisse liefern, wenn Fahraufgaben ohne zusätzlich verwertbare Bewegungsinformation zu absolvieren sind. Hierzu zählen vor allem Folgefahrten mit konstanter Abstandseinhaltung. Auch hinsichtlich der relativen Validität zu einer realen Versuchsfahrt konnten deskriptiv keine Unterschiede zwischen statisch und dynamisch in Abstandsszenarien ermittelt werden. Ein anderes Fazit ist für Folgefahrten mit Beschleunigung oder Verzögerung zu ziehen, in denen der kinetische Einfluss der Fahraufgabe durchaus gemischte Auswirkungen auf die Validität des jeweiligen Simulators hat. Einerseits wurde in Folgefahrten mit Beschleunigung geschlussfolgert, dass für größere Beschleunigungsintensitäten ($> 2.0 \text{ m/s}^2$) im dynamischen Fahrsimulator aversive Bewegungsinformation vermittelt wird, die im Konflikt zu der (teils visuell) erwarteten vestibulären Rückmeldung steht. Andererseits unterstützt die vestibuläre Information in Verzögerungsszenarien das Bremsverhalten dahingehend, dass die Bremsintensität präziser im Verhältnis zu Verzögerung des Vorderfahrzeugs dosiert werden kann. Im Zuge der Querverführungsvalidierung mithilfe der Gassen-

durchfahrt konnte gezeigt werden, dass sowohl im statischen als auch im dynamischen Fahrsimulator Engstellen differenziert wahrgenommen werden können und die Geschwindigkeit dementsprechend angepasst wird. Im dynamischen Simulator müssen hinsichtlich der relativen Validität Abstriche gemacht werden, da die zusätzliche Kinetik eine signifikante Geschwindigkeitsreduktion im Vergleich zum statischen Simulator bedingt. Die Spurposition wird darüber hinaus in beiden Simulatoren zu weit rechts gewählt, wobei hier der statische Fahrsimulator aufgrund des auffälligen Rechtsversatzes eine vermeintlich schlechtere relative Validität besitzt als der dynamische Fahrsimulator.

Vor dem Hintergrund dieser Befunde stellt sich nun die Frage, ob es lohnenswert ist, für Forschung im Fahrsimulator generell auf einen dynamischen Simulator zurückzugreifen. Betrachtet man die Ergebnisse aller Fahrscenarien zusammengenommen, so existiert ein breites Spektrum an Forschungsfragen, die durchaus annähernd valide mit einem statischen Fahrsimulator geklärt werden können. Immer dann, wenn auf bremskritische Evaluationen verzichtet werden kann, also beispielsweise bei Bedienungsbewertungen von Fahrerinformationssystemen, kann die Fragestellung valide mit einem statischen Fahrsimulator beantwortet werden. Anwendungsforschung, die konkret Verzögerungsverhalten oder den Bremsengriff von Fahrerassistenzsystemen evaluiert, stößt jedoch in statischen Simulatoren aufgrund der fehlenden kinetischen Komponente schnell an die Grenzen einer validen Realitätsabbildung. Wie bereits angedeutet, müssen nicht alle Befunde aus den beiden verglichenen Simulatoren eins zu eins auf andere Prüfumgebungen übertragen werden können. So ist es beispielsweise denkbar, dass die Spurposition ausschließlich in diesem statischen Simulator so weit nach rechts versetzt ist – in anderen statischen Fahrsimulatoren ist dieser Effekt womöglich nicht nachzuweisen. Auch unter Berücksichtigung von Kosten-Nutzen-Überlegungen kann in diesem Fall eine tendenzielle Empfehlung zur Verwendung eines statischen Fahrsimulators ausgesprochen werden, falls die oben aufgeführten experimentellen (dynamischen) Besonderheiten für die Fragestellung keine Rolle spielen.

Generell sollte an dieser Stelle auf die Grenzen der vorliegenden Studie eingegangen werden. So muss insgesamt von einer unüberschaubaren Anzahl konfundierter Variablen in der Studie ausgegangen werden, weil die Versuchsteilnehmer nicht

randomisiert der jeweiligen Prüfumgebung zugeteilt wurden. Dementsprechend wären die strengen methodischen Anforderungen eines wissenschaftlichen Experiments hierbei nicht erfüllt. Das Forschungsvorhaben sah jedoch konkret vor, zwei Fahrsimulatoren – an verschiedenen Standorten in Deutschland – im Rahmen einer Anwendungsstudie zu validieren. Daher ist es notwendig, hier die bedeutsamsten Fehlervarianzquellen zu diskutieren: Die Tatsache, dass zwei verschiedene Probandengruppen verglichen wurden, bedingt zweifelsohne interindividuelle Fehlervarianz. Da allerdings jede Probandengruppe im jeweiligen Simulator trainiert wurde, läge das größere methodische Übel in Reihenfolge- oder Übungseffekten, die aufgrund mangelhafter Transferleistung zwischen beiden Fahrsimulatoren entstanden wären, falls ein- und dieselben Versuchsteilnehmer in beiden Prüfumgebungen getestet worden wären. Selbst aus versuchsökonomischen Gründen wäre dieses Vorhaben nicht praktikabel gewesen.

Obwohl durch standardisierte Instruktionen gegen Versuchsleitereffekte vorgebeugt werden sollte, kann dennoch durch verschiedene Versuchsleiter im statischen und dynamischen Simulator eine Fehlervarianzquelle aufgetreten sein. Ein großer Anteil unerklärter Varianz kann womöglich auch in der jeweiligen simulatorspezifischen Konstruktion per se verborgen sein. Selbstverständlich können neben der Ortsbindung der Stichprobe ebenfalls jahres- und tageszeitspezifische Konfundierungen in der Testung Einfluss auf die Resultate genommen haben. Zudem berichteten einige Probanden, dass der Versuch wenig Abwechslung in der dargestellten Szenerie beinhaltete, wodurch die Motivation während der Studie mitunter gelitten haben könnte. Allerdings verweisen KONDOH et al. (2008) ausdrücklich auf den hohen realitätsbezogenen Wert dieser Folgefahrtszenarien, da vor allem der Arbeitsbereich von Fahrerassistenzsystemen häufig ein vorausfahrendes Fahrzeug annimmt.

Insgesamt umfasste die Studie nur wenige Fahraufgaben, deren Schwerpunkt fahrdynamischer Natur war. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die vorliegende Studie Teil eines größeren Ringversuchs im Verbundprojekt UR:BAN war, in dem noch weitere Prüfumgebungen mit teils geringerem dynamischen Anteil validiert wurden. Zudem bestand ein Hauptinteresse dieser Arbeit darin, konkret die Realitätsnähe und den Einsatzbereich des statischen Fahrsimulators der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) auszuloten, und somit nicht

ausschließlich den Einfluss eines Bewegungssystems im Fahrsimulator zu bewerten. Dementsprechend sollte in zukünftigen Validierungsszenarien ein höherer Anteil fahrdynamischer Aufgaben integriert sein, der beispielsweise auch Spurwechsel- oder Slalomfahrten umfasst. Wenngleich die vorliegende Studie unter manchen Einschränkungen hinsichtlich der internen Validität leidet, so ist doch die vergleichsweise hohe Kontrollierbarkeit dieser Validierung hervorzuheben. Schließlich liegt der methodische Schwerpunkt von Simulatorstudien gewöhnlich immer im Bereich der Anwendungsforschung, die bekanntermaßen mit Abstrichen in experimenteller Kontrolle verbunden ist.

Wie oben erwähnt, implizieren die Ergebnisse keineswegs, dass dieselben Befunde auch in allen anderen statischen oder dynamischen Fahrsimulatoren in derselben Weise auftreten müssen. Vielmehr beansprucht die Studie in ihrer Methodik Vorbild und Maßstab zu sein, wenn die Validierung eines Fahrsimulators beabsichtigt wird. Indem auf aufwendige Streckenvariation und den Einbezug anderer Verkehrsteilnehmer verzichtet wurde, konnte eine hoch kontrollierbare virtuelle Umgebung geschaffen werden. Diese wurde genutzt, um typische, dem realen Straßenverkehr entnommene Fahraufgaben vergleichend zu untersuchen. Obwohl es zwingend notwendig ist, sich bei Studienplanung a priori über die Aussagekraft und Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Klaren zu sein, existiert bis dato kein einheitliches, standardisiertes Validierungsverfahren für Fahrsimulatoren. Umso wünschenswerter ist es, anlehnend an die Methodik der vorliegenden Studie, einen solchen Standard in der Anwendungsforschung zu etablieren. Sowohl Entwickler als auch Nutzer würden gleichermaßen profitieren – schließlich werden weltweit täglich Erprobungen von technischen Systemen oder Bewertungen von Fahrerverhalten in Simulatoren durchgeführt, deren Aussagekraft, bezogen auf die Realität, meist noch im Dunkeln liegt.

5 Literatur

- ALLEN, R. W.; McRUER, D. T. (1977): The effect of adverse visibility on driver steering performance in an automobile simulator. *SAE Transactions*, 86, 1081-1092
- ALLEN, R. W.; ROSENTHAL, T. J.; COOK, M. L. (2011): A short history of driving simulation. In: D. L. FISHER; M. RIZZO; J. K. CAIRD; J. D. LEE (Eds.): *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (pp. 2-1-2-16). Boca Raton, FL: CRC Press
- ALM, H. (1996): Driving simulators as research tools: A validation study based on the VTI driving simulator. Unpublished internal VTI report. Linköping, Sweden: VTI, Swedish National Road and Transport Research Institute
- ANDERSEN, G. J. (2011): Sensory and perceptual factors in the design of driving simulation displays. In: D. L. FISHER; M. RIZZO; J. K. CAIRD; J. D. LEE (Eds.): *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (pp. 8-1-8-11). Boca Raton, FL: CRC Press
- ANDERSEN, G. J.; BRAUNSTEIN, M. L.; SAIDPOUR, A. (1998): The perception of depth and slant from texture in 3D scenes. *Perception*, 27, 1087-1106
- ANDERSEN, G. J.; SAUER, C. W. (2007): Optical information for car following: The driving by visual angle (DVA) model. *Human Factors*, 49, 878-896
- BELLA, F. (2005): Validation of a driving simulator for work zone design. *Transportation Research Record*, 1937, 136-144
- BELLA, F. (2008): Driving simulator for speed research on two-lane rural. *Accident Analysis and Prevention*, 40, 1078-1087
- BLANA, E.; GOLIAS, J. (2002): Differences between vehicle lateral displacement on the road and in a fixed-base simulator. *Human Factors*, 44, 303-313.
- BREMMER, F.; LAPPE, M. (1999): The use of optical velocities for distance discrimination and reproduction during visually simulated self-motion. *Experimental Brain Research*, 127, 33-42

- BRINDLE, R. (1992): Local street speed management in Australia – Is it “traffic calming”? *Accident Analysis and Prevention*, 24, 29-38
- BUCHNER, A.; BRANDT, M.; BELL, R.; WEISE, J. (2006): Car backlight position and fog density bias observer-car distance estimates and time-to-collision judgments. *Human Factors*, 48, 300-317
- CARSTEN, O.; JAMSON, A. H. (2011): Driving simulators as research tools in traffic psychology. In: B. E. PORTER (Ed.): *Handbook of Traffic Psychology* (pp. 87-96). Oxford, UK: Elsevier
- COHEN, J. (1988): *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd Ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates
- CUTTING, J. E.; VISHTON, P. M. (1995): Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In: W. EPSTEIN; S. ROGERS (Eds.): *Perception of space and motion. Handbook of Perception and Cognition* (2nd Ed., pp. 71-110). San Diego, CA: Academic Press
- DRAPER, M. H.; VIIRRE, E. S.; FURNESS, T. A.; GAWRON, V. J. (2001): Effects of image scale and system time delay on simulator sickness within head-coupled virtual environments. *Human Factors*, 43, 129-146
- ESPIÉ, S.; GAURIAT, P.; DURAZ, M. (2005): Driving simulators validation: The issue of transferability of results acquired on simulator. Orlando: Driving Simulator Conference North America
- FAUL, F.; ERDFELDER, E.; LANG, A.-G.; BUCHNER, A. (2007): G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39, 175-191
- FESTL, F. (2011): Diplomarbeit: Erkennung der Eigenbeschleunigung durch optischen Fluss. Tübingen: Eberhard Karls Universität
- FREDERICKSON, R. E.; VERSTRATEN, F. A. J.; van de GRIND, W. A. (1992): Spatio-temporal characteristics of human motion perception. *Vision Research*, 33, 1193-1205
- GIBSON, J. J. (1958): Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *The British Journal of Psychology*, 49, 182-194
- GODLEY, S. T.; TRIGGS, T. J.; FILDES, B. N. (2002): Driving simulator validation for speed research. *Accident Analysis and Prevention*, 34, 589-600
- GOLDSTEIN, E. B. (2002): *Wahrnehmungspsychologie* (G. HERBS & M. RITTER, Trans.). Heidelberg, Berlin: Spektrum
- GREEN, P. (2007): Why driving performance measures are sometimes not accurate (and methods to check accuracy). *Proceedings of the Fourth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 394-400. Iowa City, IA: University of Iowa
- GRIFFIN, M. J. (1990): *Handbook of human vibration*. London: Academic
- GROEN, E. L.; HOWARD, I. P.; CHEUNG, B. S. K. (1999): Influence of body roll on visually induced sensations of self-tilt and rotation. *Perception*, 28, 287-297
- HOFFMAN, J. D.; LEE, J. D.; BROWN, T. L.; McGEHEE, D. V. (2002): Comparison of driver braking responses in a high-fidelity simulator and on a test track. *Transportation Research Record*, 2, 59-65
- HUTCHINSON, C. H. (1958): *Automobile driving simulator feasibility study*. Buffalo, NY: Cornell Aeronautical Laboratory, Inc. (CAL)
- JAMSON, H. (2011): Cross-platform validation issues. In: D. L. FISHER; M. RIZZO; J. K. CAIRD; J. D. LEE (Eds.): *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (pp. 12-1-12-13). Boca Raton, FL: CRC Press
- KAPTEIN, N. A.; THEEUWES, J.; van der HORST, R. (1996): Driving simulator validity: Some considerations. *Transportation Research Record*, 1550, 30-36
- KEMENY, A.; PANERAI, F. (2003): Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 31-37

- KENNEDY, R. S.; BERBAUM, K. S.; LILIENTHAL, M. G.; DUNLAP, W. P.; MULLIGAN, B. E.; FUNARO, J. F. (1987): Guidelines for alleviation of simulator sickness symptomatology (NAVTRASYSCEN TR-87-007). Orlando, FL: Naval Training Systems Center
- KLEE, H.; BAUER, C.; RADWAN, E.; AL-DEEK, H. (1999): Preliminary validation of driving simulator based on forward speed. *Transportation Research Record*, 1689, 33-39
- KOLASINSKI, E. M. (1995): Simulator sickness in virtual environments (Technical report 1027). United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences
- KONDOH, T.; YAMAMURA, T.; KITAZAKI, S.; KUGE, N.; BOER, E. R. (2008): Identification of visual cues and quantification of drivers' perception of proximity risk to the lead vehicle in car-following situations. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 1, 170-180
- LARISH, J. F.; FLACH, J. M. (1990): Sources of optical information useful for perception of speed of rectilinear self-motion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 295-302
- LAURENT, G.; GABBIANI, F. (1998): Collision-avoidance: Nature's many solutions. *Nature Neuroscience*, 1, 261-263
- LEE, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5, 437-459
- LEWERENZ, F.; RÖHRL, W. (2004): Sportlich und sicher Auto fahren mit Walter RÖHRL. Stuttgart: Paul Pietsch Verlage
- LOOMIS, J.; KNAPP, J. (2003): Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. In: L. J. HETTINGER; M. W. HAAS (Eds.): *Virtual and Adaptive Environments – Applications, Implications, and Human Performance Issues* (pp. 21-46). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates
- MANSER, M. P.; HANCOCK, P. A. (2007): The influence of perceptual speed regulation on speed perception, choice, and control: Tunnel wall characteristics and influences. *Accident Analysis and Prevention*, 39, 69-78
- McGEHEE, D. V.; MAZZAE, E. N.; BALDWIN, G. H. S. (2000): Driver reaction time in crash avoidance research: Validation of a driving simulator study on a test track. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44, 320-323
- McKEE, S. P.; NAKAYAMA, K. (1984): The detection of motion in the peripheral visual field. *Vision Research*, 24, 25-32
- MUHRER, E.; VOLLRATH, M. (2010): Expectations while car following – The consequences for driving behaviour in a simulated driving task. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 2158-2164
- MULLEN, N.; CHARLTON, J.; DEVLIN, A.; BÉDARD, M. (2011): Simulator validity: Behaviors observed on the simulator and on the road. In: D. L. FISHER; M. RIZZO; J. K. CAIRD; J. D. LEE (Eds.): *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (pp. 13-1-13-18). Boca Raton, FL: CRC Press
- NEUKUM, A.; KRÜGER, H.-P. (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien. *VDI-Berichte*, 1791, 297-318
- NEUKUM, A.; LÜBBEKE, T.; KRÜGER, H.-P.; MAYSER, C.; STEINLE, J. (2008): ACC-Stop-and-Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In: M. MAURER; C. STILLER (Hrsg.): *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS 2008* (S. 141-150). Karlsruhe: fmrt
- NGUYEN-TRI, D.; FAUBERT, J. (2007): Luminance texture increases perceived speed. *Vision Research*, 47, 723-734
- PAGE, N. G. R.; GREASY, M. A. (1985): Motorist's vestibular disorientation syndrome. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 48, 729-735
- PANERAI, F.; DROULEZ, J.; KELADA, J.-M.; KEMENY, A.; BALLIGAND, E.; FAVRE, B. (2001): Speed and safety distance control in truck driving: Comparison of simulation and real-world environment. *Sophia Antipolis: Driving Simulator Conference North America*

- PLUMERT, J. M.; KEARNEY, J. K.; CREMER, J. F.; RECKER, K. (2005): Distance perception in real and virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2, 216-233
- PURUCKER, C.; RÜGER, F.; SCHNEIDER, N.; NEUKUM, A.; FÄRBER, B. (accepted): Comparing the perception of critical longitudinal distances between dynamic driving simulation, test track and vehicle in the loop. Paper presented at the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2014): Krakow
- REASON, J. T. (1978): Motion sickness adaptation: A neural mismatch model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71, 819-829
- REYMOND, G.; KEMENY, A.; DROULEZ, J.; BERTHOZ, A. (2001): Role of Lateral acceleration in curve driving: Driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. *Human Factors*, 43, 483-495
- RICCIO, G. E.; STOFFREGEN, T. A. (1991): An ecological theory of motion sickness and postural instability. *Ecological Psychology*, 3, 195-240
- ROGERS, B. J.; COLLETT, T. S. (1989): The appearance of surfaces specified by motion parallax and binocular disparity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 41, 697-717
- SANTOS, J.; MERAT, N.; MOUTA, S.; BROOKHUIS, K.; de WAARD, D. (2005): The interaction between driving and in-vehicle information systems: Comparison of results from laboratory, simulator and real-world studies. *Transportation Research Part F*, 8, 135-146
- SMART, L. J.; STOFFREGEN, T. A.; BARDY, B. G. (2002): Visually induced motion sickness predicted by postural instability. *Human Factors*, 44, 451-465
- STAM, T. (2013): Master thesis report: Headway performance in the University of Twente driving simulator: A validation study. Twente: University of Twente
- STEFFREGEN, T. A.; RICCIO, G. E. (1991): An ecological critique of the sensory conflict theory of motion sickness. *Ecological Psychology*, 3, 159-194
- STOFFREGEN, T. A.; SMART, L. J. (1998): Postural instability precedes motion sickness. *Brain Research Bulletin*, 47, 437-448
- STONER, H. A.; FISHER, D. L.; MOLLENHAUER, M. (2011): Simulator and scenario factors influencing simulator sickness. In: D. L. FISHER; M. RIZZO; J. K. CAIRD; J. D. LEE (Eds.): *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (pp. 14-1-14-24). Boca Raton, FL: CRC Press
- THARANATHAN, A.; DELUCIA, P. R. (2006): Time-to-collision judgments of constant and non-constant velocities: Implications for rear-end collisions. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50, 2463-2467
- TÖRNROS, J. (1998): Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel – A validation study. *Accident Analysis and Prevention*, 30, 497-503
- van WINSUM, W. (1999): The human element in car following models. *Transportation Research Part F*, 2, 207-211
- WADE, M. G.; HAMMOND, C. (1998): Simulator validation: Evaluating driver performance in simulation and the real world (report no. 28). Minneapolis, MN: Minnesota Department of Transportation
- WARREN, W. H.; HANNON, D. J. (1990): Eye movements and optical flow. *Journal of the Optical Society of America*, 7, 160-169
- WEBBER, B. L.; PHILLIPS, C. B.; BADLER, N. I. (1993): *Simulating humans: Computer graphics, animation, and control*. New York: Oxford University Press
- WICKENS, C. D.; HOLLANDS, J. G. (2000): *Engineering psychology and human performance*. (3rd Ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall
- WICKENS, C. D.; LEE, J. D.; LIU, Y.; GORDON BECKER, S. E. (2004): *An introduction to human factors engineering* (2nd Ed.). Pearson, London

WIERWILLE, W. W.; CASALI, J. G.; REPA, B. S. (1983): Driver steering reaction time to abrupt-onset crosswinds, as measured in a moving-base driving simulator. *Human Factors*, 25, 103-116

WOLFE, J. M.; KLUENDER, K. R.; LEVI, D. M.; BARTOSHUK, L. M.; HERZ, R. S.; KLATZKY, R. L.; LEDERMAN, S. J.; MERFELD, D. M. (2009): *Sensation & perception*. Sunderland, MA: Sinauer Associates

YOUNG, K. L.; REGAN, M. A.; LEE, J. D. (2008): Measuring the effects of driver distraction: Direct driving performance methods and measures. In: M. A. REGAN; J. D. LEE; K. L. YOUNG (Eds.): *Driver Distraction – Theory, Effects, and Mitigation* (pp. 85-106). Boca Raton, FL: CRC Press

Anhang

Anhang A Trainingsablauf im statischen Fahrsimulator

Hintergrund

Vor der Teilnahme an Untersuchungen durchlaufen alle Probanden ein speziell entwickeltes Training. Mit diesem Training sollen sie mit dem Fahrsimulator und dem Simulatorfahrzeug vertraut werden. Weiterhin soll die „Simulator Sickness“ (Übelkeit im Simulator) abgebaut werden. Diese kann in Fahrsimulatoren auftreten, weil die Bewegungswahrnehmung während der Fahrt nicht dem entspricht, was der Körper aufgrund von Erfahrungen erwartet.

Trainingsablauf

Dauer* : 2 Stunden

1	Freies Fahren auf gerader Strecke ohne Berücksichtigung der StVO		5 min
2	Befahren einer Überlandstrecke unter Einhaltung der StVO		10 min
3	Trainieren der Längsführung		10 min
4	Trainieren der Querführung		10 min
5	Trainieren von Abbiegevorgängen		5 min
6	Überlandfahrt		15 min
(7)	Spezielle Übung zum Fahren in der Stadt		optional

Anhang B Fragebögen der Simulationsszenarien

Fragebogen „Abstand herstellen“ und „Abstand schätzen“

Onlinebefragung AH / AS



Bitte bewerten Sie den Abstand, welchen Sie eben hergestellt haben. Der Abstand war...

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
nichts bemerkt	1
	0

Ist Ihnen das Herstellen des Abstandes gelungen?

ja nein

Wie gut ist Ihnen das Herstellen des Abstandes gelungen?

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

Fragebogen „Folgefahrt mit Beschleunigung oder Verzögerung“

Onlinebefragung FB/FV



Bitte bewerten Sie die Bremssituation, welche Sie eben durchfahren haben.
Die Situation war...

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Ist Ihnen das Einhalten des Abstands gelungen?

ja nein

Wie gut ist Ihnen das Einhalten gelungen?

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

Wie stark hat das Vorderfahrzeug beschleunigt/verzögert?

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

Fragebogen „Okklusionsversuch“

<p>Onlinebefragung OV TTC</p>	 																																
<p>Ist Ihnen das Schätzen des Zeitabstandes gelungen?</p> <p style="text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</p>																																	
<p>Wenn ja, wie gut ist Ihnen das Schätzen des Zeitabstandes gelungen?</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 16.6%;">gar nicht</td> <td colspan="3">sehr schlecht</td> <td colspan="3">schlecht</td> <td colspan="3">mittel</td> <td colspan="3">gut</td> <td colspan="3">sehr gut</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td><td>2</td><td>3</td> <td>4</td><td>5</td><td>6</td> <td>7</td><td>8</td><td>9</td> <td>10</td><td>11</td><td>12</td> <td>13</td><td>14</td><td>15</td> </tr> </table>		gar nicht	sehr schlecht			schlecht			mittel			gut			sehr gut			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
gar nicht	sehr schlecht			schlecht			mittel			gut			sehr gut																				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15																		
<p>Hätten Sie das Fahrzeug bei Beginn der Okklusion noch rechtzeitig vor einer Kollision abbremsen können?</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 16.6%;">gar nicht</td> <td colspan="3">sehr schlecht</td> <td colspan="3">schlecht</td> <td colspan="3">mittel</td> <td colspan="3">gut</td> <td colspan="3">sehr gut</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td><td>2</td><td>3</td> <td>4</td><td>5</td><td>6</td> <td>7</td><td>8</td><td>9</td> <td>10</td><td>11</td><td>12</td> <td>13</td><td>14</td><td>15</td> </tr> </table>		gar nicht	sehr schlecht			schlecht			mittel			gut			sehr gut			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
gar nicht	sehr schlecht			schlecht			mittel			gut			sehr gut																				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15																		
<p>Wie kritisch war in diesem Fall der Abstand bei Beginn der Okklusion? Der Abstand war...</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: black; color: white; text-align: center; padding: 5px;">nicht kontrollierbar</td> <td style="background-color: black; color: white; text-align: center; padding: 5px;">10</td> </tr> <tr> <td rowspan="4" style="background-color: red; color: white; text-align: center; padding: 5px;">gefährlich</td> <td style="background-color: red; color: white; text-align: center; padding: 5px;">9</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red; color: white; text-align: center; padding: 5px;">8</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red; color: white; text-align: center; padding: 5px;">7</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red; color: white; text-align: center; padding: 5px;">6</td> </tr> <tr> <td rowspan="3" style="background-color: gray; color: white; text-align: center; padding: 5px;">unangenehm</td> <td style="background-color: gray; color: white; text-align: center; padding: 5px;">5</td> </tr> <tr> <td style="background-color: gray; color: white; text-align: center; padding: 5px;">4</td> </tr> <tr> <td style="background-color: gray; color: white; text-align: center; padding: 5px;">3</td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="background-color: green; color: white; text-align: center; padding: 5px;">harmlos</td> <td style="background-color: green; color: white; text-align: center; padding: 5px;">2</td> </tr> <tr> <td style="background-color: green; color: white; text-align: center; padding: 5px;">1</td> </tr> <tr> <td style="background-color: white; color: black; text-align: center; padding: 5px;">nichts bemerkt</td> <td style="background-color: white; color: black; text-align: center; padding: 5px;">0</td> </tr> </table>		nicht kontrollierbar	10	gefährlich	9	8	7	6	unangenehm	5	4	3	harmlos	2	1	nichts bemerkt	0																
nicht kontrollierbar	10																																
gefährlich	9																																
	8																																
	7																																
	6																																
unangenehm	5																																
	4																																
	3																																
harmlos	2																																
	1																																
nichts bemerkt	0																																
<p><small>© Alle Rechte beim Interdisziplinären Zentrum für Verkehrswissenschaften (IZVW), auch für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen. Jede Verfügungsbefugnis, wie Kopie- und Weitergaberechte bei uns.</small></p>																																	

Fragebogen „Gassendurchfahrt“

Onlinebefragung GB



Bitte bewerten Sie die Gassenbreite, welche Sie eben durchfahren haben.
Die Gassenbreite war...

nicht passierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Ist Ihnen das Durchfahren der Gasse gelungen?

ja nein

Wie gut ist Ihnen das Durchfahren der Gasse gelungen?

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

Wie viel Platz hatten Sie zur Verfügung?

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

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2008

- F 66: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen
Jebas, Schellinger, Klinger, Manz, Kooß € 15,50
- F 67: Optimierung von Kinderschutzsystemen im Pkw
Weber € 20,00
- F 68: Cost-benefit analysis for ABS of motorcycles
Baum, Westerkamp, Geißler € 20,00
- F 69: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland
Auerbach, Issing, Karrer, Steffens € 18,00
- F 70: Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen
Gail, Pöppel-Decker, Lorig, Eggers, Lerner, Ellmers € 13,50

2009

- F 71: Erkennbarkeit von Motorrädern am Tag – Untersuchungen zum vorderen Signalbild
Bartels, Sander € 13,50
- F 72: 3rd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 5th / 6th September 2008 at Hannover Medical School € 29,50
- F 73: Objektive Erkennung kritischer Fahrsituationen von Motorrädern
Seiniger, Winner € 16,50

2010

- F 74: Auswirkungen des Fahrens mit Tempomat und ACC auf das Fahrerverhalten
Vollrath, Briest, Oeltze € 15,50
- F 75: Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen
Müller, Johannsen, Fastenmaier € 15,50

2011

- F 76: Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Bovenkerk, Gies, Urban € 19,50
- F 77: 4th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50
- F 78: Elektronische Manipulation von Fahrzeug- und Infrastruktursystemen
Dittmann, Hoppe, Kiltz, Tuchscheerer € 17,50
- F 79: Internationale und nationale Telematik-Leitbilder und IST-Architekturen im Straßenverkehr
Boltze, Krüger, Reusswig, Hillebrand € 22,00

- F 80: Untersuchungskonzepte für die Evaluation von Systemen zur Erkennung des Fahrerzustands
Eichinger € 15,00

- F 81: Potential aktiver Fahrwerke für die Fahrsicherheit von Motorrädern
Wunram, Eckstein, Rettweiler € 15,50

- F 82: Qualität von on-trip Verkehrsinformationen im Straßenverkehr – Quality of on-trip road traffic information – BAST-Kolloquium 23. & 24.03.2011
Lotz, Luks € 17,50
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

2012

- F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe
Gasser, Arzt, Ayoubi, Bartels, Bürkle, Eier, Flemisch, Häcker, Hesse, Huber, Lotz, Maurer, Ruth-Schumacher, Schwarz, Vogt € 19,50

- F 84: Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen – Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendwarnungen
Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks, Mühlbacher € 17,00

- F 85: Cooperative Systems Stakeholder Analysis
Schindhelm, Calderaro, Udin, Larsson, Kernstock, Jandrisits, Ricci, Geißler, Herb, Vierkötter € 15,50

2013

- F 86: Experimentelle Untersuchung zur Unterstützung der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für ältere Kraftfahrer
Hoffmann, Wipking, Blanke, Falkenstein € 16,50

- F 87: 5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

- F 88: Comparative tests with laminated safety glass panes and polycarbonate panes
Gehring, Zander € 14,00

- F 89: Erfassung der Fahrermüdigkeit
Platho, Pietrek, Kolrep € 16,50

- F 90: Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit
Nuß, Eckstein, Berger € 17,90

- F 91: Standardisierungsprozess für offene Systeme der Straßenverkehrstelematik
Kroen € 17,00

- F 92: Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung
Beyer, Blumenschein, Bönninger, Grohmann, Lehmann, Meißner, Paulan, Richter, Stiller, Calker € 17,00

2014

- F 93: Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung beim Motorradfahren
Buld, Will, Kaussner, Krüger € 17,50

- F 94: Biokraftstoffe – Fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen
Pellmann, Schmidt, Eckhardt, Wagner € 19,50

F 95: Taxonomie von Fehlhandlungen bei der Fahrzeugführung
Oehme, Kolrep, Person, Byl € 16,50

F 96: Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von Pkw
Schönemann, Henze € 15,50

F 97: Matrix von Lösungsvarianten Intelligenter Verkehrssysteme (IVS) im Straßenverkehr
Matrix of alternative implementation approaches of Intelligent Transport Systems (ITS) in road traffic
Lotz, Herb, Schindhelm, Vierkötter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 98: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung
Weitzel, Winner, Peng, Geyer, Lotz Sefati € 16,50

F 99: Study on smoke production, development and toxicity in bus fires
Hofmann, Dülsen € 16,50

2015

F 100: Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver
Powelleit, Muhrer, Vollrath, Henze, Liesner, Pawellek € 17,50

F 101: Altersabhängige Anpassung von Menschmodellen für die passive Fahrzeugsicherheit
Wagner, Segura, Mühlbauer, Fuchs, Peldschus, Freßmann € 19,00

F 102: 6th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 103: Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen
Süßmann, Lienkamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 104: Abbiege-Assistenzsystem für Lkw – Grundlagen eine Testverfahrens
Schreck, Seiniger € 14,50

F 105: Abgasverhalten von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Feldüberwachung
Schmidt, Georges € 14,50

F 105b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – In-service conformity
Schmidt, Johannsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 106: Untersuchung des Abgasverhaltens von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Austauschkatalysatoren
Schmidt, Johannsen € 13,50

F 106b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – Replacement catalytic converters
Schmidt, Johannsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 107: Sicherheitsaspekte beim Laden von Elektrofahrzeugen
Vogt, Link, Ritzinger, Ablingyte, Reindl € 16,50

F 108: Interoperabilität zwischen öffentlichem Verkehrsmanagement und individuellen Navigationsdiensten – Maßnahmen zur Gewährleistung
von der Ruhren, Kirschfink, Ansorge, Reusswig, Riegelhuth, Karina-Wedrich, Schopf, Sparmann, Wöbbeking, Kannenberg € 17,50

F 109: Ermittlung des Umfangs von Abweichungen bei Durchführung der Abgasuntersuchung zwischen Messung am Auspuff und Abfrage des On-Board-Diagnosesystems
Schröder, Steickert, Walther, Ranftl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 110: Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen
Altinsoy, Landgraf, Rosenkranz, Lachmann, Hagen, Schulze, Schlag
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 111: Geräuschminderung von Dünnschichtbelägen
Schulze, Kluth, Ruhnau, Hübelt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

F 112: Ersatz von Außenspiegeln durch Kamera-Monitor-Systeme bei Pkw und Lkw
Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens € 17,50

F 112b: Final Report Camera-Monitor-Systems as a Replacement for Exterior Mirrors in Cars and Trucks
Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 113: Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe
Bergk, Heidt, Knörr, Keller € 15,50

F 114: Barrierefreiheit bei Fernlinienbussen
Oehme, Berberich, Maier, Böhm € 17,50

F 115: Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit
Frey
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de