

Analyse des Einflusses ausgewählter Gestaltungsparameter einer Fahrsimulation auf die Fahrerhaltensvalidität

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
angenommene

DISSERTATION

vorgelegt von

M.Sc. Ilka Maria Zöller

aus Offenbach am Main

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf

Tag der Einreichung: 14.01.2015

Tag der mündlichen Prüfung: 19.05.2015

Darmstadt 2015

D17

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbstständig verfasst habe.

Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt.

Meine ersten Dankesworte möchte ich an meinen Doktorvater *Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder* richten. Durch die Möglichkeit, an Ihrem Institut zu promovieren, haben Sie den Grundstein für diese Arbeit gelegt. Zudem haben Sie mich über die komplette Promotionsphase hinweg immer wieder fachlich unterstützt und mich so auf meinem Weg begleitet.

Für die Übernahme des Koreferats möchte ich mich bei *Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf* herzlich bedanken.

Meinen Kolleginnen und Kollegen gilt mein Dank für zahlreiche fruchtbare Diskussionen, offene Ohren und Unterstützung in jeglicher Art. Der bunte Mix aus den verschiedensten Fachrichtungen, die bei uns am Institut zusammentreffen, gestaltet die Forschung und Arbeit abwechslungsreich und vor allem fachlich, aber auch persönlich gewinnbringend. In diesem Zusammenhang möchte ich mich im Besonderen bedanken bei:

Bettina Abendroth für ihre grenzenlose Hilfsbereitschaft und Verfügbarkeit zu jeder Zeit. Mit dir habe ich nicht nur die beste Arbeitsgruppenleiterin, sondern in erster Linie auch einen tollen Menschen an meiner Seite gehabt.

Lukas Bier für seine unentwegte Unterstützung jeglicher Art. Ohne dich hätte die Arbeit nur halb so viel Spaß gemacht und sie wäre mir doppelt so anstrengend vorgekommen.

Christina König für eine sehr herzliche, aber zugleich auch produktive Bürogemeinschaft. Ich habe die gemeinsame Zeit mit dir auf der Arbeit, aber auch außerhalb dieser sehr genossen.

Benjamin Franz für die vielen gemeinsamen Projektarbeiten und Arbeitspausen. Du hast mich sehr oft mit deinen Fähigkeiten und deiner Erfahrung unterstützt. Vor allem aber hast du mir immer fleißig bei der Vernichtung unseres Nespresso- und Haribo-Vorrats geholfen.

Michaela Kauer für die Übernahme der Mentorenrolle. Mit dir hatte ich eine sehr erfahrene Wissenschaftlerin an meiner Seite, von der ich mir nicht selten hilfreiches Feedback einholte.

Ingmar Langer für all die Energie, die er in seine Rolle als Doktorandensprecher investiert. Du bist einer der engagiertesten Menschen, die ich kenne.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen Studentinnen und Studenten, die im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten sowie als studentische Hilfskräfte wesentlich zur Erstellung der vorliegenden Arbeit beigetragen haben. Ohne euer Engagement und euren inhaltlichen Ertrag wäre dies nicht möglich gewesen. Zudem hat mir die Zusammenarbeit stets großen Spaß gemacht. Daher möchte ich meinen persönlichen Dank aussprechen an:

Alexander Jesionek, Boris Pagojus, Christian Fiebig, Christoph Hansen, Dominik Stauder, Eduard Gaar, Franziskus Halbig, Jonas Grosch, Lisa Seebold, Malte Zierk, Max Luh, Minzhi Qi, Nan Yang, Natalie Wegner, Nicole Mautes, Sebastian Grimm, Simon Käsmann, Sirui Qiu, Stefan Schork, Suthan Logarajah, Wen Ren.

Besonderen Dank möchte ich abschließend an meine Familie richten, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg sowie insbesondere in der Promotionsphase begleitet, unterstützt und immer wieder neu motiviert hat. Allen voran möchte ich hier meine *Mutter* nennen, da ich ihr nicht nur die Möglichkeit des Studierens und somit den Grundstein der Promotion zu verdanken habe, sondern auch sehr viel Freude, Kraft und Zeit. Auch *Jochen* möchte ich herzlich danken für die Zeit und Bereitschaft, das Lektorat meiner Arbeit zu übernehmen. Zudem freue ich mich sehr, dass du nun zu unserer Familie gehörst und nicht nur meiner Mutter ein toller Partner, sondern auch meinem Sohn ein toller Großvater bist. Ich freue mich, dass zu meiner Familie auch mein geliebter Bruder *Marco* zählt. Zudem sei an dieser Stelle mein *Vater* erwähnt, der meine Promotionszeit leider nicht mehr mitbekommen hat, dem ich aber das Interesse am Automobil zu verdanken habe. Meinen *Schwiegereltern* und meiner Freundin *Julia* möchte ich herzlich Danke sagen; wenn ihr nicht immer wieder die Betreuung meines Sohnes übernommen hättet, wäre die Disputationsvorbereitung nicht möglich gewesen.

Schließlich komme ich zu den wichtigsten Dankesworten, die meiner eigenen kleinen Familie gehören. Hierzu zählst allen voran du, *René*. Du hast mir so viel Freude, Zuversicht, Verständnis und Liebe geschenkt. Vor allem aber hast du mir durch unseren Sohn *Micah León* und somit die Gründung unserer eigenen Familie pures Lebensglück bereitet. Für mich wird dieses private Glück immer über beruflichem Erfolg stehen.

Jedem von euch danke ich von ganzem Herzen, da ohne euch diese Arbeit nie geschrieben worden wäre!

Zusammenfassung

Die Bedeutung von Fahrsimulatoren als Untersuchungsumgebung für Fahrversuche steigt zunehmend. Eine wesentliche Voraussetzung für den Rückgriff auf eine Simulation anstelle eines realen Versuchsumfelds ist jedoch die Gewährleistung der Übertragbarkeit des Fahrerhaltens auf die Realität. Das Forschungsfeld der Fahrerhaltensvalidität eines Fahrsimulators, das sich mit dieser Frage befasst, gewinnt entsprechend an Relevanz. Es existieren bereits zahlreiche Untersuchungsreihen in diesem Bereich. Dabei lassen sich jedoch Schwachstellen in der Untersuchungsmethodik sowie insbesondere ein stark divergierender Erkenntniswert hinsichtlich der Validität von Fahrsimulatoren erkennen. Als eine mögliche Ursache dieser Abweichungen können die sich zwischen den Studien unterscheidenden Versuchskonstellationen gesehen werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das komplexe Feld der Fahrerhaltensvalidität von Fahrsimulatoren näher zu erforschen, indem die Fragen des Einflusses ausgewählter Gestaltungsparameter eines Fahrsimulators und des Untersuchungsszenarios auf die Fahrerhaltensvalidität beantwortet werden. Hierzu wird zunächst im Rahmen einer modellbasierten Betrachtung die Wirkungskette von Szenario und Gestaltungsparameter auf die einzelnen Validitätskennwerte theoretisch hergeleitet. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei auf der Wahrnehmungsphysiologie des Menschen. Anschließend wird eine empirische Validierungsstudie vorgestellt, die den zuvor theoretisch hergeleiteten Einfluss näher quantifiziert und so evaluiert. Dabei wird auf eine methodisch saubere Untersuchungsdurchführung Wert gelegt, um die angesprochenen Methodikschwächen bisheriger Studien gezielt zu vermeiden.

Ein Abgleich der empirischen Ergebnisse mit den theoretisch aufgestellten Annahmen zeigt, dass die Fahrsimulatorvalidität durchaus von den Einflussgrößen Untersuchungsszenario und Gestaltungsparameter abhängig ist. Die Richtung und Stärke dieser Einflüsse lässt sich jedoch weder theoretisch herleiten noch pauschal von einer empirischen Studie bestimmen, da es sich bei der Fahrerhaltensvalidität um ein äußerst komplexes Konstrukt handelt. Es existieren vielfältige Zusammenhänge zwischen einzelnen Einflussgrößen und Validitätsaspekten. So zeigt sich im Rahmen der empirischen Studie das interessante Ergebnis, dass eine Gestaltungsparameter-Erweiterung nicht zwangsläufig zu einer positiven oder zumindest neutralen Beeinflussung des Validitätsergebnisses führt. Vor allem ein vergleichbares Maß an Qualität und Harmonie einzelner dargebotener Reize in einem Fahrsimulator scheint eine hohe Bedeutung für die Fahrerhaltensvalidität und die Immersion des Probanden in das Verkehrsgeschehen zu haben.

Um dieser Vielfalt und Komplexität an Zusammenhängen zu begegnen, liefert die vorliegende Arbeit beispielhafte erste wichtige Erkenntnisse dahingehend, welcher Kennwert sich unter Rückgriff auf welches Parameterset und in welchem Szenario valide abbilden lässt.

Abstract

Driving simulators are becoming increasingly important as an evaluation environment for driving tests. However, a key prerequisite for using a simulation instead of a real test environment is that transferability of driver behavior to reality be ensured. The research area of validity of driver behavior in a driving simulator which addresses this question is accordingly becoming increasingly relevant. There are already many series of investigations in this area. However, weaknesses in investigative methodology as well as significantly diverging values with regard to the validity of driving simulators are evident. A possible cause of these differences may be the different test configurations between the studies.

The purpose of this study is to examine the complex issue of the validity of driver behavior in further detail by investigating the effect of selected parameters of a driving simulator and of the investigation scenario on the validity of driver behavior. In order to accomplish this, the causal chain of the scenario and parameters on the individual validity characteristics is first derived theoretically in the context of a model-based evaluation. The evaluation focuses here on the physiology of human perception. An empirical validation study is then presented which further quantifies and thus evaluates the effect previously derived theoretically. Emphasis is placed here on a methodologically clean investigation so as to deliberately avoid the aforementioned methodological weaknesses of previous studies.

A comparison of the empirical results with the theoretically derived assumptions shows that driving simulator validity is highly dependent on the investigation scenario and parameters as influencing factors. However, the direction and magnitude of these effects can neither be theoretically derived nor generally determined from an empirical study, as the validity of driver behavior represents an extremely complex construct. There is a wide range of relationships between individual influencing factors and validity aspects. For example, the empirical study yields the interesting result that an expansion of parameters does not automatically result in a positive or even neutral effect on the validity result. A comparable degree of quality and harmony of the individual stimuli offered in a driving simulator appears in particular to be of great importance for the validity of driver behavior and the immersion of the subject in the traffic situation.

In order to address this variety and complexity of interdependencies, this study provides initial important example results regarding which parameter can be validly simulated with reference to which parameter set and in which scenario.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	14
1.1	Motivation	14
1.2	Zielsetzung	16
1.3	Aufbau der Arbeit.....	17
2	Stand der Forschung.....	18
2.1	Grundlagen von Fahr simulatoren.....	18
2.2	Validität eines Fahr simulators.....	21
2.2.1	Definition.....	21
2.2.2	Methodik.....	24
2.2.3	Einflussfaktoren.....	25
2.3	Validierungsstudien.....	28
2.3.1	Validierungsstudien im Überblick.....	28
2.3.2	Validierungsstudien mit Feld- und Fahr simulatorversuch	30
2.3.3	Validierungsstudien mit Feldversuchen und Variationen im Fahr simulatorversuch	34
2.3.4	Validierungsstudien mit Feldversuch und Versuchen in verschiedenen Fahr simulatoren	35
2.3.5	Validierungsstudien mit Variationen im Fahr simulatorversuch.....	36
2.3.6	Validierungsstudien mit Versuchen in verschiedenen Fahr simulatoren	38
2.3.7	Ergebnisse zu Validitätskennwerten.....	38
2.3.8	Kritische Betrachtung bisheriger Forschung	43
2.4	Szenario und Gestaltungsparameter als Einflussfaktoren auf die Fahrerverhaltensvalidität	46
2.4.1	Menschliche Informationswahrnehmung	46
2.4.2	Grundlagen visueller Informationswahrnehmung	49
2.4.3	Grundlagen vestibulärer Informationswahrnehmung.....	53
2.4.4	Fazit	56
3	Modellbildung	57
4	Untersuchungskonzept der Validierungsstudie	62
4.1	Untersuchungsziel und Leithypothesen.....	62

4.2 Anforderungen an das Versuchsdesign	64
4.3 Versuchsaufbau	65
4.3.1 Versuchsstrecke und Szenarien	65
4.3.2 Probandenkollektiv	69
4.3.3 Versuchsträger	70
4.4 Datenerfassung	71
4.4.1 Expertenbefragung.....	71
4.4.2 Definitionen und Aussagegehalt.....	74
4.4.3 Messmethoden	77
4.5 Zeitsynchronisierung, Aufbereitung und Auswertung der Daten	82
4.6 Versuchsdesign.....	88
4.7 Versuchsdurchführung	90
4.8 Detaillierung der Untersuchungshypothesen.....	92
4.8.1 Detaillierung der Leithypothesen LH ₁₋₄	92
4.8.2 Detaillierung der Leithypothese LH _R	95
4.8.3 Motivation der Leithypothese LH _S	95
5 Ergebnisse der Validierungsstudie	97
5.1 Statistische Grundlagen.....	97
5.2 Fahrdynamikkennwerte	100
5.3 Fahrerverhaltenskennwerte	112
5.4 Physiologische Kennwerte	133
5.5 Subjektive Kennwerte	141
5.6 Aggregierte Ergebnisdarstellung im Modell.....	148
6 Diskussion	153
6.1 Methodikdiskussion.....	153
6.2 Modelldiskussion.....	159
7 Fazit und Ausblick.....	163
8 Zusammenfassung	1
Literaturverzeichnis.....	165
Anhang	182

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: NADS MiniSim als Beispiel eines low-level Simulators.....	15
Abbildung 1.2: IAD Fahrsimulator als Beispiel eines mid-level Simulators.....	15
Abbildung 1.3: Toyota Driving Simulator als Beispiel eines high-level Simulators.....	15
Abbildung 1.4: Aufbau der Arbeit.....	17
Abbildung 2.1: Untersuchungsumgebungen für Fahrversuche.....	18
Abbildung 2.2: Begriffsverständnis.....	23
Abbildung 2.3: Kontextspezifische Erweiterung des Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts nach Rohmert (1984).....	26
Abbildung 2.4: Gruppierung bisheriger Validierungsstudien anhand ihrer Aussagekraft und der Variation des Fahrsimulators.....	29
Abbildung 2.5: Querschnitt durch das Auge mit unterschiedlichen Sehbereichen.....	50
Abbildung 2.6: Menschliches Ohr mit Vestibulärapparat.....	54
Abbildung 2.7 Aktionskette im Realfahrzeug und im Fahrsimulator.....	54
Abbildung 3.1: Erste Detaillierungsstufe des Modells.....	57
Abbildung 3.2: Zweite Detaillierungsstufe des Modells.....	58
Abbildung 4.1: Kontinuum des Verkehrsverhaltens.....	65
Abbildung 4.2: Google Earth® Ausschnitte der Szenerien Autobahn und Landstraße.....	67
Abbildung 4.3: Google Earth© Ausschnitt der Szenerie Stadt.....	67
Abbildung 4.4: Dynamischer Fahrsimulator und realer Versuchsträger Honda Accord 2.4 ...	71
Abbildung 4.5: Schnittmenge zwischen der Expertenbefragung sowie den in realer und simulierter Umgebung erfassbaren Fahrdynamikkennwerten.....	78
Abbildung 4.6: Eye-Tracking-Messsystem.....	80
Abbildung 4.7: Ableitorte des EKG und des EDA.....	81
Abbildung 4.8: Auswahl der sechs zu betrachtenden komplexen Kreuzungssituationen.....	85
Abbildung 4.9: FOV horizontal von 180° mit drei Monitoren.....	89
Abbildung 4.10: FOV horizontal von 60° mit einem Monitor.....	89
Abbildung 4.11: Zeitliche Abfolge der Versuchsfahrten.....	91
Abbildung 5.1: Übersicht über das statistische Vorgehen nach Bortz (2005) und Field (2009).	98
Abbildung 5.2: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Mittlere Geschwindigkeit"	100
Abbildung 5.3: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Maximale Geschwindigkeit"	102
Abbildung 5.4: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Mittlerer Abstand"	104
Abbildung 5.5: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Minimaler Abstand"	105
Abbildung 5.6: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Mittlere TTC"	107
Abbildung 5.7: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Minimale TTC"	108

Abbildung 5.8: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Straße“	113
Abbildung 5.9: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Straße“	114
Abbildung 5.10: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Umgebung“	115
Abbildung 5.11: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Umgebung“, getrennt nach Freier Fahrt und Folgefahrt auf der Autobahn	116
Abbildung 5.12: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Umgebung“	117
Abbildung 5.13: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Umgebung“, getrennt nach Freier Fahrt und Folgefahrt auf der Autobahn	118
Abbildung 5.14: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Verkehr“	119
Abbildung 5.15: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Verkehr“, getrennt nach Freier Fahrt und Folgefahrt auf der Autobahn	120
Abbildung 5.16: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Verkehr“	121
Abbildung 5.17: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Verkehr“, getrennt nach Freier Fahrt und Folgefahrt auf der Autobahn	122
Abbildung 5.18: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Gegenverkehr“	123
Abbildung 5.19: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Gegenverkehr“	124
Abbildung 5.20: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Tacho“	126
Abbildung 5.21: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Tacho“	127
Abbildung 5.22: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Ampel/Schild“	128
Abbildung 5.23: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Ampel/Schild“	130
Abbildung 5.24: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „ARHR“	133
Abbildung 5.25: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „ARSCL“	135
Abbildung 5.26: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „SCR-Amplitude“	136
Abbildung 5.27: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „rMSSD“	137

Abbildung 5.28: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „pNN50"	138
Abbildung 5.29: Deskriptive Ergebnisdarstellung der Kennwerte „Realitätsgrad Simulatorfahrt" und „Übelkeitsgefühl“	141
Abbildung 5.30: Deskriptive Ergebnisdarstellung der Kennwerte „Schwierigkeit Geschwindigkeitsregelung" und „Schwierigkeit Beschleunigungseinschätzung“	143
Abbildung 5.31: Deskriptive Ergebnisdarstellung der Kennwerte „Schwierigkeit Abstandseinschätzung" und „Schwierigkeit Kurvenlenkung"	144
Abbildung 5.32: Deskriptive Ergebnisdarstellung der Kennwerte „Realitätsgrad Größe der Projektionsfläche" und „Realitätsgrad Bewegungssimulation"	146
Abbildung 5.33: Evaluiertes Modell für die Szenerie Autobahn	149
Abbildung 5.34: Evaluiertes Modell für die Szenerie Landstraße	150
Abbildung 5.35: Evaluiertes Modell für die Szenerie Stadt.....	152

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile einer simulierten Untersuchungsumgebung	20
Tabelle 2.2: Validierungsstudien mit Feld- und Fahr Simulatorversuch	30
Tabelle 2.3: Validierungsstudien mit Feldversuch und Variationen im Fahr Simulatorversuch	34
Tabelle 2.4: Validierungsstudien mit Feldversuch und Versuchen in verschiedenen Fahr Simulatoren	35
Tabelle 2.5: Validierungsstudien mit Variationen im Fahr Simulatorversuch	36
Tabelle 2.6: Validierungsstudien mit Versuchen in verschiedenen Fahr Simulatoren	38
Tabelle 2.7: Ergebnisse bisheriger Validierungsstudien zu einzelnen Kennwerten	39
Tabelle 2.8: Sensorische Modalitäten der menschlichen Informationsaufnahme	47
Tabelle 2.9: Zuordnung fahrzeugführungsrelevanter Informationen zu den Sinneskanälen ..	48
Tabelle 4.1: Leithypothesen	63
Tabelle 4.2: Szenerien und Szenarien der Versuchsstrecke	68
Tabelle 4.3: Abgrenzungskriterien der Szenarien Freie Fahrt und Folgefahrt	69
Tabelle 4.4: Ergebnisse der Expertenbefragung im Bereich Fahrdynamikkennwerte	72
Tabelle 4.5: Ergebnisse der Expertenbefragung im Bereich Fahrerhaltenskennwerte	72
Tabelle 4.6: Ergebnisse der Expertenbefragung im Bereich physiologischer Kennwerte	73
Tabelle 4.7: Ergebnisse der Expertenbefragung im Bereich subjektiver Kennwerte	73
Tabelle 4.8: Definitionen und wesentliche Informationen zu den betrachteten Fahrdynamikkennwerten	74
Tabelle 4.9: Definitionen und wesentliche Informationen zu den betrachteten Fahrerhaltenskennwerten	76
Tabelle 4.10: Definitionen und wesentliche Informationen zu den betrachteten physiologischen Kennwerten	76
Tabelle 4.11: Bezeichnung, Einheit und Aufzeichnungsrate der Messsysteme in Feld und Simulator	79
Tabelle 4.12: Technische Angaben der Messdaten des Varioport	80
Tabelle 4.13: Übersicht über die berücksichtigten Areas of Interests (AOI) und ihre Objektzugehörigkeit	83
Tabelle 4.14: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss der Szeneriereihenfolge	86
Tabelle 4.15: Informationen zu den HRV-Parametern	88
Tabelle 4.16: Übersicht über die vier Parametersets im Fahr Simulatorversuch	89
Tabelle 4.17: Versuchsplan: Zuordnung der 6 Probandengruppen zu den Parametersetreihenfolgen und Szenerieabfolgen	90
Tabelle 4.18: Detaillierung der Hypothesen für die Fahrdynamikkennwerte	93
Tabelle 4.19: Detaillierung der Hypothesen für die Fahrerhaltenskennwerte	94

Tabelle 4.20: Detaillierung der Hypothesen für die physiologischen Kennwerte	94
Tabelle 4.21: Detaillierung der Hypothesen für die subjektiven Kennwerte.....	95
Tabelle 5.1: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Mittlere Geschwindigkeit“ in [m/s]	100
Tabelle 5.2: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Maximale Geschwindigkeit“ in [m/s]	103
Tabelle 5.3: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Mittlerer Abstand“ in [m].....	104
Tabelle 5.4: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Minimaler Abstand“ in [m].....	106
Tabelle 5.5: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Mittlere TTC“ in [s] ..	107
Tabelle 5.6: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Minimale TTC“ in [s]	109
Tabelle 5.7: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesen und statistischen Ergebnisse für die Fahrdynamikkennwerte	111
Tabelle 5.8: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Straße“ in [%].....	113
Tabelle 5.9: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Straße“ in [%]	114
Tabelle 5.10: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Umgebung“ in [%]	115
Tabelle 5.11: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Umgebung“ in [%].....	117
Tabelle 5.12: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Verkehr“ in [%].....	119
Tabelle 5.13: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Verkehr“ in [%]	121
Tabelle 5.14: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Gegenverkehr“ in [%]	123
Tabelle 5.15: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Gegenverkehr“ in [%].....	125
Tabelle 5.16: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Tacho“ in [%].....	126
Tabelle 5.17: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Tacho“ in [%]	127
Tabelle 5.18: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Ampel/Schild“ in [%].....	129
Tabelle 5.19: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Ampel/Schild“ in [%]	130
Tabelle 5.20: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesen und statistischen Ergebnisse für die Fahrerverhaltenskennwerte	131

Tabelle 5.21: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „ARHR“ in [bpm].....	133
Tabelle 5.22: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „ARSCL“	135
Tabelle 5.23: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „SCR-Amplitude“ in [μ S]	136
Tabelle 5.24: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „rMSSD“ in [ms]	137
Tabelle 5.25: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „pNN50“ in [%].....	139
Tabelle 5.26: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesen und statistischen Ergebnisse für die physiologischen Kennwerte.....	140
Tabelle 5.27: Mittelwert und Standardabweichung der Kennwerte „Realitätsgrad Simulatorfahrt“ und „Übelkeitsgefühl“ in Skalenpunkten	142
Tabelle 5.28: Mittelwert und Standardabweichung der Kennwerte „Schwierigkeit Geschwindigkeitsregelung“ und „Schwierigkeit Beschleunigungseinschätzung“ in Skalenpunkten.....	143
Tabelle 5.29: Mittelwert und Standardabweichung der Kennwerte „Schwierigkeit Abstandseinschätzung“ und „Schwierigkeit Kurvenlenkung“ in Skalenpunkten.....	145
Tabelle 5.30: Mittelwert und Standardabweichung der Kennwerte „Realitätsgrad Größe der Projektionsfläche“ und „Realitätsgrad Bewegungssimulation“ in Skalenpunkten.....	146
Tabelle 5.31: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesen und statistischen Ergebnisse für die subjektiven Kennwerte	147

Abkürzungsverzeichnis

A	Autobahn
A_FoF	Autobahn, Folgefahrt
A_FrF	Autobahn, Freie Fahrt
A_G	Autobahnszenerie gesamt
AOI	Area of Interest
b	Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau gültig
bpm	beats per minute
Dyn	Dynamik
dyn.	dynamisch
EDA	Elektrodermale Aktivität
EKG	Elektrokardiogramm
FOV	Field of View
HLW	Hautleitwert
HR	Herzschlagrate/-frequenz
HRV	Herzschlagvariabilität
L	Landstraße
L_FoF	Landstraße, Folgefahrt
L_FrF	Landstraße, Freie Fahrt
L_G	Landstraßenszenerie gesamt
LH	Leithypothese
M	Mittelwert
Max	Maximalwert
Min	Minimalwert
NaN	Not a Number
NASA-TLX	National Aeronautics & Space Administration Task-Load Index
o.J.	ohne Jahr
S	Stadt
S_A	Stadt, Abbiegevorgänge

S_G	Stadtszenerie gesamt
S_O	Stadt, Ohne Richtungsänderung
SCL	Skin Conductance Level
SCR	Skin Conductance Response
SD	Standardabweichung
stat.	statisch
StVO	Straßenverkehrsordnung
SWAT	Subjective Workload Assessment Technique
TLC	Time to Line Crossing
TTC	Time to Collision

In der vorliegenden Arbeit wird nur aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich die männliche Form von Mitarbeitern verwendet. Die Betrachtungen schließen Mitarbeiterinnen selbstverständlich in gleichem Maße mit ein.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Neben Flugsimulatoren, die im Ausbildungs- und Trainingsbereich von Piloten längst als Standard etabliert und nicht mehr wegzudenken sind (Hancock & Sheridan, 2011), gewinnen auch Fahrsimulatoren als Untersuchungsumgebung für Fahrversuche neben Feldstudien zunehmend an Bedeutung. Ein klassisches Anwendungsfeld von Fahrsimulatoren stellt die Erprobung von aktuell im Mittelpunkt vieler Forschungsvorhaben stehenden Automatisierungskonzepten dar. Während die in realer Untersuchungsumgebung vorherrschenden Sicherheitsrisiken zu groß wären, bieten Fahrsimulatoren eine sichere alternative Testumgebung.

Die Bandbreite und Komplexität aktueller Fahrsimulatoren, die für Forschungsvorhaben zum Einsatz kommen, ist enorm (Harms, 1996; Straus, 2005). Es existieren Minimallösungen als Desktopaufbauten bis hin zu dynamischen Simulatoren mit 360° Display sowie visuellem, auditivem und taktilem Feedback (McLaughlin, Hankey & Dingus, 2009). Als Bewegungsplattform dienen dabei in der Regel hydraulisch angesteuerte Hexapods¹. Zwischen diesen beispielhaft genannten Aufbauten von Fahrsimulatoren, die als Extreme eines Kontinuums zu verstehen sind, gibt es eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten. Zur Klassifizierung der enormen Bandbreite an Fahrsimulatoren bietet sich ein Rückgriff auf die mit dem Fahrsimulator verbundenen Anschaffungskosten an. Die gängigste Klassifizierung in diesem Bereich geht zurück auf Weir & Clarke (1995). Sie nehmen eine Klassifizierung von Fahrsimulatoren entsprechend ihrer Beschaffungskosten in drei Stufen vor. Die folgenden näheren Ausführungen sind Jamson (2011) entnommen.

Die einfachste Art eines Fahrsimulators besteht meist aus einem Desktop-PC und wird als **low-level** bezeichnet (Beispiele: *NADS MiniSim*, *STISIM*, *Leeds LabSim*). Zur Sichtsimulation finden ein oder mehrere Monitore Anwendung, die Bedienelemente (Lenkrad, Pedalerie) können über Krafrückkopplungen (Force-Feedback) verfügen. Teilweise werden auch Motoren- und Umgebungsgeräusche simuliert. Abbildung 1.1 zeigt einen entsprechenden low-level Simulator.

Die zweite Klasse bilden die sog. **mid-level**-Simulatoren (Beispiele: *CHRISS*, *TNO Fixed-base Driving Simulator*, *IAD Fahrsimulator*), die im Gegensatz zu den low-level Aufbauten über eine meist über Projektoren realisierte, deutlich erweiterte Sichtsimulation verfügen. Als Sitzkiste dient ein stark realitätsnahes Mockup, welches teilweise kleine Vibrations- bzw. Bewegungssimulationen über Sitz, Lenkrad oder Radaufhängung ermöglicht. Haptische Rückmeldungen in Lenkrad und Pedalerie sind ebenfalls vorhanden. Abbildung 1.2 zeigt den IAD Fahrsimulator als Beispiel einer mid-level Variante.

¹ Ein Hexapod, auch Stewart-Plattform genannt, ist eine Parallelkinematikmaschine, die Bewegungen in sechs Freiheitsgrade ermöglicht (Fischer, 2009).



Abbildung 1.1: NADS MiniSim als Beispiel eines low-level Simulators (www.nads-sc.uiowa.edu).

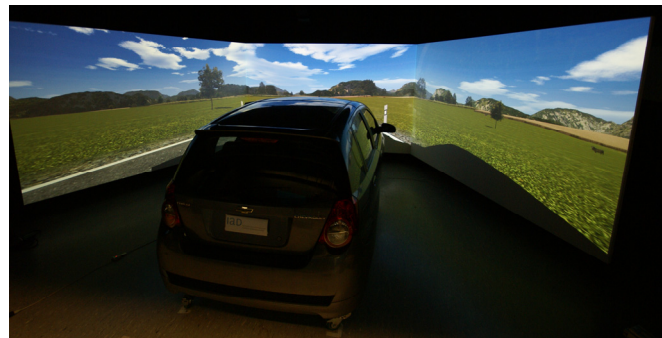


Abbildung 1.2: IAD Fahr Simulator als Beispiel eines mid-level Simulators.

High-level Simulatoren (Beispiele: *Toyota Driving Simulator*, *Daimler Fahr Simulator*, *DLR Fahr Simulator*, *NADS*, *VTI*) bieten die höchste Wiedergabetreue. Sie verfügen über eine umfangreiche Bewegungssimulation mit mindestens sechs Freiheitsgraden und können einen 360° Sichtwinkel simulieren. Nicht selten kommen komplette Mittelklasse-Fahrzeugchassis als Mockup zum Einsatz, die in einem Dom platziert sind, der mit der Bewegungsplattform verbunden ist. Abbildung 1.3 zeigt den high-level Fahr Simulator von Toyota.

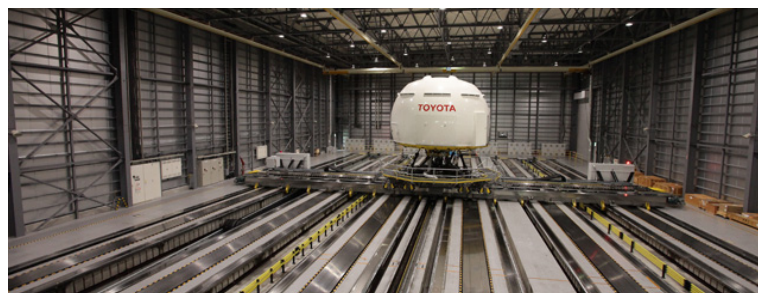


Abbildung 1.3: Toyota Driving Simulator als Beispiel eines high-level Simulators (www.toyota-global.com).

In Forschung und Entwicklung finden sich Fahr Simulatoren aus allen drei Kostenniveaus und somit auch mit den unterschiedlichsten Gestaltungsparameter-Konfigurationen. Als Gestaltungsparameter werden dabei die einzelnen physikalischen und technischen Parameter eines Fahr Simulators verstanden. Eng in Verbindung mit den jeweils vorhandenen Gestaltungsparametern und ihren Ausprägungen ist die mit einem Fahr Simulator erzielbare Darstellungsgüte. Hierunter wird in der vorliegenden Arbeit der Grad verstanden, zu dem ein Fahr Simulator

die Realität bzgl. aller Sinneskanäle abbilden kann. Selbst bei einem high-level Fahrsimulator wird die Realität dabei nicht zu 100% abgebildet; allerdings ist dies auch nicht zwingend erforderlich (Padmos & Milders, 1992). Um Fahrversuche sinnvoll in simulierter statt in realer Untersuchungsumgebung durchführen zu können, muss das Fahrerverhalten in simulierter Umgebung, welches anhand von verschiedenen Kennwerten analysiert werden kann, auf die Realität übertragbar sein. Mit dieser Thematik beschäftigt sich das Forschungsfeld der Fahrerverhaltensvalidität von Fahrsimulatoren.

Zentrale Fragen im Zusammenhang mit der Fahrerverhaltensvalidität beziehen sich darauf, ob sich ein Fahrsimulator als geeignete Untersuchungsumgebung für eine spezifische Forschungsfrage erweist und welche Mindestausstattung für valide Ergebnisse notwendig ist, da nicht jede Forschungseinrichtung über einen kostenintensiven high-level Fahrsimulator verfügt und dessen Betriebskosten vor einem wirtschaftlichen Gesichtspunkt nur bei Notwendigkeit verursacht werden sollten.

Dabei ist auch das jeweilige Untersuchungsszenario zu berücksichtigen. So zeigen bisherige Validierungsstudien immer wieder unterschiedliche Ergebnisse für unterschiedliche Szenarien, sodass keine allgemeingültigen Aussagen für einen Fahrsimulator, losgelöst von diesem weiteren Einflussfaktor, möglich sind.

1.2 Zielsetzung

Die Arbeit zielt darauf ab, zu der Frage der Mindestausstattung eines validen Fahrsimulators in Abhängigkeit des jeweiligen Untersuchungsszenarios beizutragen.

Mit Hilfe einer theoretischen Herleitung und einer empirischen Evaluation werden folgende Fragen beantwortet:

- 1) *Sind Einflüsse ausgewählter Gestaltungsparameter auf die Fahrerverhaltensvalidität eines Fahrsimulators zu verzeichnen?*
- 2) *Ist ein Einfluss des jeweiligen Untersuchungsszenarios auf die Fahrerverhaltensvalidität eines Fahrsimulators zu verzeichnen?*

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen für eine umfangreiche Kennwert-Betrachtung im Bereich des Fahrerverhaltens, in welchem Szenario und bei welcher Gestaltungsparameter-Ausstattung eine ausreichende Übertragbarkeit auf die Realität gewährleistet ist und der entsprechende Kennwert somit valide in einer simulierten Umgebung erhoben werden kann.

Der Fokus der Betrachtung liegt auf zwei Gestaltungsparametern eines Fahrsimulators: Bewegungssimulation und Sichtwinkel horizontal. Beide Gestaltungsparameter tragen, je nach ihrer jeweiligen Ausprägung, maßgeblich zur mit einem Fahrsimulator erzielbaren Darstellungsgüte bei. Die systematische Erweiterung der Gestaltungsparameter setzt dabei an einem

low-level Fahr Simulator an, um den Einfluss bereits kleiner, kostengünstiger Änderungen in Richtung einer größeren Darstellungsgüte quantifizieren zu können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Um die beiden zentralen Fragen dieser Arbeit zu beantworten, wird zunächst auf Basis wahrnehmungsphysiologischer Grundlagen eine theoretische Herleitung der Wirkungszusammenhänge zwischen den Einflussgrößen Szenario bzw. Gestaltungsparameter und der Fahrer Verhaltensvalidität vollzogen. Anschließend wird eine breit angelegte empirische Validierungsstudie vorgestellt, die diesen theoretisch hergeleiteten Einfluss auf einzelne Validitätskennwerte quantifiziert und so evaluiert.

Die Arbeit gliedert sich grob in vier inhaltliche Abschnitte (Abbildung 1.4).

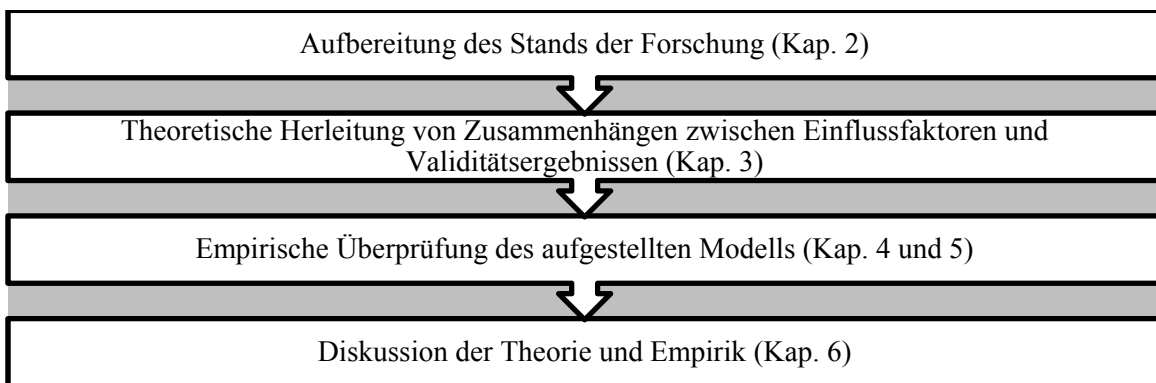


Abbildung 1.4: Aufbau der Arbeit.

Zunächst einmal wird der Stand der Forschung im Bereich Fahr Simulator und Validitätsanalytik aufbereitet, um eine fundierte Wissensbasis auf diesem Gebiet zu erarbeiten (Kapitel 2.1-2.3). Um die sich abzeichnenden Forschungslücken, den Einfluss des Untersuchungsszenarios und der Gestaltungsparameter eines Fahr Simulators betreffend, schließen zu können, wird mit der Erläuterung der menschlichen Informationsverarbeitung (Kap. 2.4) die Grundlage für eine anschließende theoretische Modellbildung gelegt. Das in einem nächsten Schritt hergeleitete Modell erklärt die Wirkungskette von Untersuchungsszenario und Gestaltungsparameter auf die Handlung und Beanspruchung des Fahrers im Fahr Simulator und somit letztlich auf die Fahrer Verhaltensvalidität mit Hilfe des Informationsverarbeitungsprozesses (Kap. 3). Zur Überprüfung und Evaluation dieser theoretischen Herleitung wird eine empirische Untersuchungsreihe konzipiert (Kap. 4), die die aus dem Modell heraus abgeleiteten Hypothesen überprüft. Die Ergebnisse werden in Kap. 5 zunächst nach Kennwertkategorien getrennt dargestellt und schließlich für die Szenarien aggregiert in das Modell eingetragen. Anschließend folgt eine kritische Betrachtung und Diskussion der theoretischen Modellbildung sowie der empirischen Untersuchungsmethodik (Kap. 6). Die Arbeit endet mit einem Fazit und Ausblick zur Validitätsanalytik von Fahr Simulatoren (Kap. 7).

2 Stand der Forschung

Der Stand der Forschung im Bereich der Validitätsanalytik von Fahrsimulatoren wird im Folgenden dargestellt, um eine Wissensbasis für später folgende theoretische Herleitungen und empirische Untersuchungen zu schaffen.

Zunächst wird auf grundlegende Aspekte eines Fahrsimulators als Untersuchungsumgebung eingegangen. Hierzu zählen neben typischen Fragestellungen auch die Vor- und Nachteile einer simulierten Umgebung. Aufgrund der als nachteilhaft einzustufenden Künstlichkeit der Umgebung stellt sich bei Rückgriff auf einen Fahrsimulator stets die Frage der Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse auf die Realität. Mit dieser Frage beschäftigt sich das Forschungsfeld der Validitätsanalytik, auf das im Anschluss eingegangen wird. Nach der Vorstellung der Methodik und der Einflussfaktoren auf die Validität, wird auf bereits durchgeführte Validitätsstudien eingegangen. Es zeichnen sich Kritikpunkte und vor allem Widersprüche ab, die eine Betrachtung der Einflussfaktoren Gestaltungsparameter und Szenario auf die Validitätsergebnisse nahelegen. Da der Mensch im Fahrsimulator beide Einflussgrößen über seine Sinnesorgane wahrnimmt, sein Verhalten dementsprechend anpasst und sich dies auf die Validität auswirken kann, werden schließlich die Grundlagen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses vorgestellt.

2.1 Grundlagen von Fahrsimulatoren

Typischer Bestandteil vieler Untersuchungsinitiativen der Fahrzeugforschung ist die Durchführung von Fahrversuchen. Die möglichen Untersuchungsumgebungen für derartige Praxisversuche lassen sich in Abhängigkeit des Echtheitsgrads der Testbedingungen und der Möglichkeiten der Variablenmanipulation in zwei Klassen einteilen: Labor- und Feldstudien (Bruder, Abendroth & Landau, 2007; Abbildung 2.1).

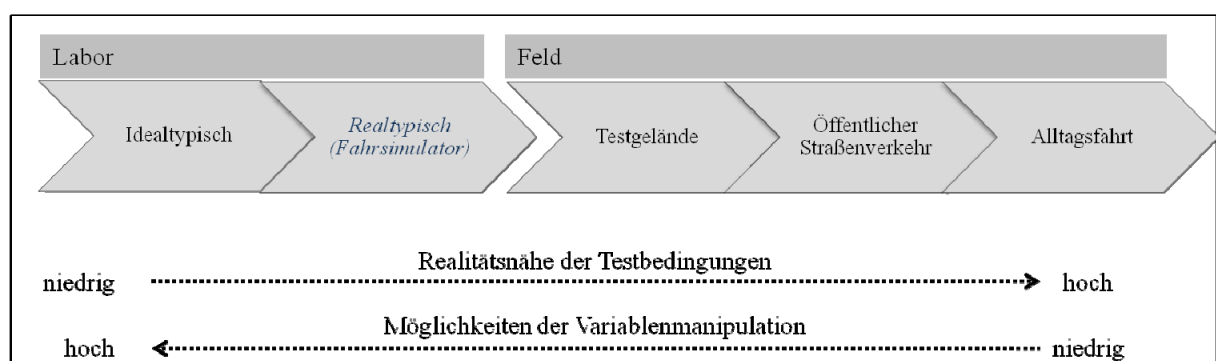


Abbildung 2.1: Untersuchungsumgebungen für Fahrversuche (in Anlehnung an Bruder et al., 2007).

Laboruntersuchungen können ihrerseits weiter aufgliedert werden in „idealtypische“ Untersuchungsbedingungen mit dem höchsten Potential der Versuchsmanipulation und „realtypi-

sche“ Versuche mit demgegenüber etwas höherem Echtheitsgrad der Testbedingungen. Felduntersuchungen können ebenfalls anhand der beiden genannten Kriterien klassifiziert werden. Hier steigt der Echtheitsgrad der Versuchsbedingungen von einer Versuchsfahrt auf abgesperrtem „Testgelände“ über Fahrten auf „öffentlichen Straßen“ bis hin zur Beobachtung und Messung von „Alltagsfahrten“; die Möglichkeiten der gezielten Manipulation von Variablen nehmen hingegen stetig ab (Bruder et al., 2007).

Die genannten, alternativen Untersuchungsumgebungen, die für Fahrversuche Anwendung finden können, zeichnen sich durch spezifische Vor- und Nachteile aus. Je nach Untersuchungsziel ist eine Untersuchungsumgebung daher mehr oder weniger gut geeignet. Fahrsimulatoruntersuchungen gewinnen dabei stetig an Bedeutung (Green, 2005; Pinto, Cavallo & Ohlmann, 2008). Sie stellen eine angemessene Alternative zu Feldversuchen dar (Bella, 2008).

Als Oberbegriff bezeichnet eine Simulation eine abstrakte Darstellung der Realität, die Teilaspekte dieser abbildet, während andere Aspekte ausgeblendet bleiben (Molino et al., 2005). Unter einem Fahrsimulator wird ein System verstanden, welches eine kohärente, multi-sensorische Umgebung nachbildet, um den Fahrer eine virtuelle Fahrzeugführung wahrnehmen und kontrollieren zu lassen (Kemeny & Panerai, 2003).

Im Folgenden werden exemplarische Anwendungsgebiete von Fahrsimulatoruntersuchungen genannt:

- Erprobung von (Fahrerinformations-/ -assistenz-) Systemen bereits im frühen Entwicklungsstadium, Überprüfung der fahrerseitigen Akzeptanz (Blana, 1996a; Abendroth, Schreiber, Bruder, Maul & Maul, 2012; Philipp, 1990).
- Fahrtraining und Ausbildung (Bertin, Collet & Graf, 2005; Negele, 2007)
- Untersuchung des Fahrerverhaltens unter bestimmten Aspekten (z. B. Medikamenten-/ Alkoholeinfluss, Alterseffekte, Aufmerksamkeit) (Negele, 2007)
- Untersuchungen zu Infrastrukturelementen (z. B. Straßengestaltung, Beleuchtungsverhältnisse) (Negele, 2007; Blana, 1996a)

Für die genannten Zielsetzungen einer Studie bieten Fahrsimulatoren wesentliche Vorteile gegenüber einer realen Untersuchungsumgebung. Eine ausführliche Beschreibung bestehender Vor- und Nachteile in einer simulierten Untersuchungsumgebung findet sich in Caird & Horrey (2011). Im Folgenden werden einige bedeutende Vor- und auch Nachteile stellvertretend aufgeführt (Tabelle 2.1).

Wesentliche Vorteile von simulierten Fahrversuchen ergeben sich aus der Künstlichkeit der Umgebung. So sind Versuche im Fahrsimulator umweltschonend, verschleißfrei, kostengünstig und ohne Risiko für den Menschen. Versuchsbedingungen lassen sich gezielt variieren und über die komplette Versuchsreihe konstant halten. Die Erfassung von Fahrzeugdaten kann mühelos erfolgen, da viele Simulationssoftwares eine entsprechende Datenerfassung anbieten.

Die dargestellten Vorteile müssen jedoch Nachteilen gegenübergestellt werden. Die Künstlichkeit der Umgebung ist dem Probanden durchaus bewusst, woraus sich eine Änderung der Aufmerksamkeit und ein gegenüber dem Feld ggf. risikoreicheres, verändertes Fahrverhalten ergeben können (Jamson & Jamson, 2010; Alm, 1995). Zudem kann die Problematik der Simulatorkrankheit auftreten (Blana, 1996b). Ein Fahr Simulator stellt stets nur eine Nachbildung der realen Umgebung dar, unabhängig von der Güte des Simulatoreaufbaus. Die Realität wird niemals zu 100% abgebildet (Knappe, 2009; Hoffmann & Buld, 2006). Es stellt sich die Frage, inwieweit eine Übertragbarkeit von im Simulator gewonnenen Ergebnissen auf die Ergebnisse realer Feldversuche gewährleistet ist. Diese Validität eines Fahr Simulators ist kritisch zu betrachten und näher zu erforschen, bevor Versuche in simulierter Umgebung stattfinden.

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile einer simulierten Untersuchungsumgebung (in Anlehnung an Caird & Horrey, 2011).

Vorteile	Nachteile
Schonung der Umwelt	Ggf. Beeinflussung der Aufmerksamkeit der Probanden durch Künstlichkeit der Umgebung
Kein Verschleiß	Ggf. Beeinflussung des Fahrverhaltens durch Künstlichkeit der Umgebung
Einsparung von Kosten	Risiko der Simulatorkrankheit
Keine Gefährdung der Probanden	Keine 100%-Abbildung der Realität
Möglichkeit der gezielten Variation der Versuchsbedingungen	
Möglichkeit des Konstanthaltens von Versuchsbedingungen	
Einfache Datenerfassung	

Die Bandbreite und Komplexität aktueller Fahr Simulatoren, die für Forschungsvorhaben zum Einsatz kommen, ist, wie bereits gezeigt, enorm. Unterschiede ergeben sich nicht nur hinsichtlich der weit auseinander gehenden Anschaffungs- und Betriebskosten der simulierten Untersuchungsumgebungen, sondern vor allem auch hinsichtlich der mit ihnen erzielbaren Darstellungsgüte. Die erzielbare Darstellungsgüte hängt unmittelbar mit den Gestaltungsparametern eines Fahr Simulators zusammen.

Die Gestaltungsparameter eines Fahr Simulators entscheiden über die Informationsfülle, die der Fahrer in der simulierten Umgebung dargeboten bekommt. Einteilen lassen sich die Gestaltungsparameter anhand der menschlichen Wahrnehmungskanäle (visuell, auditiv, haptisch, vestibulär), die die Informationen der Gestaltungsparameter als Reize aufnehmen. Im Anhang dieser Arbeit befindet sich eine Übersicht wesentlicher Gestaltungsparameter getrennt nach Wahrnehmungskanal und unter Angabe ggf. bekannter Mindestanforderungen. Die Liste erhebt jedoch nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern stellt lediglich die wesentlichen in der Literatur gefundenen Gestaltungsparameter und Forschungserkenntnisse systematisch zusammen. Auf die Parameter Sichtwinkel horizontal als visueller Gestaltungsparameter und Bewegungssimulation als vestibulärer Gestaltungsparameter wird im Rahmen dieser Ar-

beit vertiefend eingegangen. Durch den Abgleich zwischen von den Gestaltungsparametern gelieferten Reizen und Informationen und der Realität ist eine Aussage zur Darstellungsgüte und somit Validität eines Fahrsimulators möglich. Herauszustellen bleibt jedoch, dass eine 100%-Abbildung der Realität weder möglich noch nötig ist für valide Ergebnisse (Padmos & Milders, 1992). Auf die Validitätsforschung wird nun vertiefend eingegangen.

2.2 Validität eines Fahrsimulators

Es folgt zunächst eine Begriffsdefinition von „Validität“ im allgemeinspsychologischen Kontext, bevor auf die Schwierigkeiten der Übertragung dieses Verständnisses auf die fahrsimulatorbezogene Validität eingegangen wird. Der wesentliche Ansatz zur Fahrsimulatorvalidität wird schließlich vorgestellt und die Begriffe der physikalischen und verhaltensbezogenen Validität werden definiert. Der Fokus wird daraufhin auf die verhaltensbezogene Validität beschränkt; neben der Methodik zur Bestimmung dieser werden Einflussfaktoren näher beleuchtet.

2.2.1 Definition

Die Durchführung von Tests gilt als quantitative Methode der Datenerhebung (Bortz & Döring, 2006). Lienert & Raatz (1998) definieren einen Test als „wissenschaftliches Routineverfahren zur Untersuchung eines oder mehrerer empirisch abgrenzbarer Persönlichkeitsmerkmale mit dem Ziel einer möglichst quantitativen Aussage über den relativen Grad der individuellen Merkmalsausprägung“ (S. 1). An einen Test werden drei Forderungen gestellt, um dessen Güte zu beurteilen (Bortz & Döring, 2006; Lienert & Raatz, 1998): Objektivität, Zuverlässigkeit (Reliabilität) und Gültigkeit (Validität).

- Die **Objektivität** eines Tests gilt als gegeben, sofern die erzielten Untersuchungsergebnisse nicht von der Person des Untersuchungsleiters abhängig sind.
- Die **Reliabilität** spiegelt die Präzision bzw. Genauigkeit wider, mit der ein bestimmtes Persönlichkeits- oder Verhaltensmerkmal im Rahmen eines Tests gemessen wird. Ob der Test dieses Merkmal auch zu messen beansprucht, ist Frage der Validität.
- Die **Validität** eines Tests wiederum gibt Aufschluss hinsichtlich der Frage, ob und zu welchem Grad ein Test dasjenige Merkmal misst, was er zu messen vorgibt.

Analog zu der Gütebeurteilung psychologischer Testreihen lässt sich auch die Evaluation eines Fahrsimulators in drei Aspekte unterteilen: (1) Übertragbarkeit der im Fahrsimulator gewonnenen Ergebnisse auf die Realität (Objektivität, transferability), (2) Reliabilität (reliability) sowie (3) Validität (validity) eines Fahrsimulators (Blana, 1996a). Als wichtigster Aspekt wird die Validität eines Fahrsimulators gesehen (Blana, 1996a). In den folgenden Abschnitten wird daher auf diesen Evaluationsschritt näher eingegangen.

Während es aus psychologischer Sicht klare Definitionen und Standards (APA, 2008) für valide Untersuchungen gibt, gestalten sich diese Aspekte im Kontext Fahrsimulator als durchaus komplexer und weniger klar abgrenzbar. Ursache hierfür ist die mit dem Themengebiet verbundene Multidisziplinarität (Blana, 1996a), handelt es sich doch um ein Zusammentreffen von menschlicher Performance und Systemperformance.

Es gibt verschiedene Ansätze zur Überprüfung der Fahrsimulatorvalidität; eine ausführlichere Beschreibung findet sich in Blana (1996a). Fahrsimulatorvalidität als umfassende Begrifflichkeit beinhaltet dabei stets die physikalische und die verhaltensbezogene Validität. Diese Klassifizierung geht zurück auf Mudd (1968) und McCormick (1970), welche sich als erste an einem Ansatz zur Überprüfung der Fahrsimulatorvalidität versuchten (Blana, 1996a). Die **physikalische Validität** beschreibt, wie gut ein Fahrsimulator die Fahreigenschaften und die äußere Gestalt des Fahrzeugs repliziert, das simuliert wird (Blaauw, 1982). Dieser Validitätsaspekt beinhaltet demnach u. a. das Layout, die Geometrie der Bedienelemente und die dynamischen Charakteristika bzw. Rückgabewerte des Fahrsimulators (Blana, 1996a; Reed & Green, 1995). So tragen beispielsweise eine reale Fahrzeugkabine als Mockup sowie der Einsatz von Force-Feedback Systemen zur Erhöhung der physikalischen Validität bei (Reed & Green, 1995). Die **verhaltensbezogene Validität** hingegen beschreibt den Abgleich des Fahrerverhaltens in simuliertem und realem Versuchsumfeld und gilt dann als gegeben, wenn sich das Fahrerverhalten in gewissen Toleranzen gleicht bzw. nicht signifikant unterscheidet (Reed & Green, 1995; Blaauw, 1982). Die Fahrerverhaltensvalidität nimmt dabei an, dass die Beziehung zwischen einem experimentellen Stimulus (z. B. Fußgänger) und dem entsprechenden korrespondierenden Fahrerverhalten (z. B. Bremsen) in realer und simulierter Umgebung gleich ausfällt (Shechtman, Classen, Awadzi & Mann, 2009).

Es finden sich weitere Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit der Validität eines Fahrsimulators. So sprechen Allen, Rosenthal & Cook (2011) von **Augenscheinvalidität** (face validity) und verstehen darunter die Eigenschaft eines Fahrsimulators, eine überzeugende Impression auf physikalischer Ebene (statisch) zu erzeugen. Ein detailgetreuer Nachbau des Fahrzeugs inkl. des Fahrzeuginnenraums (Instrumente, Bedienelemente) führt zu einer hohen Augenscheinvalidität. Gemäß Reimer, D'Ambrosio, Coughlin, Kafrissen & Blederman (2006) kann Augenscheinvalidität mit der physikalischen Validität gleichgesetzt werden. Diesem Verständnis wird im Rahmen dieser Arbeit nur teilweise zugestimmt. So gibt es neben der Augenscheinvalidität als statischem Aspekt einen weiteren dynamischen Aspekt, der in die physikalische Validität mit eingeht. Blana & Golias (2002) verwenden in diesem Zusammenhang den Begriff der **Wiedergabetreue** (fidelity) als den Grad, zu dem ein Simulator die Realität während der Fahrt wiedergibt. Die Augenscheinvalidität und Wiedergabetreue beeinflussen direkt die physikalische Validität und, nach einem Abgleich mit den subjektiven Wertvorstellungen und internen Modellen des Probanden, das subjektiv von ihm empfundene Realitätsempfinden einer Fahrsimulatorfahrt. Ein damit eng in Verbindung stehender Begriff ist der der „emotionalen Validität“, den Jamson & Jamson (2010) ansprechen. Dieses Realitätsemp-

finden beeinflusst das Fahrerverhalten und somit die fahrerverhaltensbezogene Validität. Eine unter Forschern weit verbreitete Annahme besagt, dass Verhaltensvalidität und physikalische Validität voneinander unabhängig sind, jedoch in Wechselwirkung stehen (Blaauw, 1982; Blana, 1996a). So kann aber die physikalische Validität, wie angenommen, einen positiven Effekt auf die verhaltensbezogene Korrespondenz haben (Ahlström, Bolling, Sörensen, Eriksson & Andersson, 2012).

An dieser Stelle soll auf zwei weitere verwandte Begrifflichkeiten eingegangen werden: Immersion und Präsenz. Einer Definition von Slater & Wilbur (1997) zufolge bezieht sich die **Immersion** auf den objektiv feststellbaren Detaillierungsgrad der sensorischen Wiedergabetreue einer virtuell dargestellten Realität und ist rein von der Qualität der synthetischen Welt abhängig. Immersion kann somit mit dem bereits angesprochenen dynamischen Aspekt der Wiedergabetreue gleichgesetzt werden. Der Begriff der **Präsenz** hingegen beschreibt die subjektive, psychologische Reaktion eines Benutzers auf die virtuelle Realität, die entsprechend vom Benutzer und seinem Erleben abhängig ist. Die Präsenz kann mit dem subjektiven Realitätsgrad gleichgesetzt werden, den ein Proband bei einer Fahrt im Fahrsimulator empfindet. Gemäß Slater, Linakis, Usoh & Kooper (1996) gibt es zwei Einflussfaktoren auf die Präsenz: die Immersion (im Speziellen das sog. „matching“ als die adäquate Reaktionsausgabe einer virtuellen Umgebung auf die vom Benutzer vorgenommene Eingabe) und die Übereinstimmung der wiedergegebenen sensorischen Daten mit den subjektiven Wertvorstellungen und internen Modellen des Benutzers. Die einzelnen Begrifflichkeiten und das dieser Arbeit zugrunde gelegte Verständnis der Abhängigkeiten sind in Abbildung 2.2 wiedergegeben.

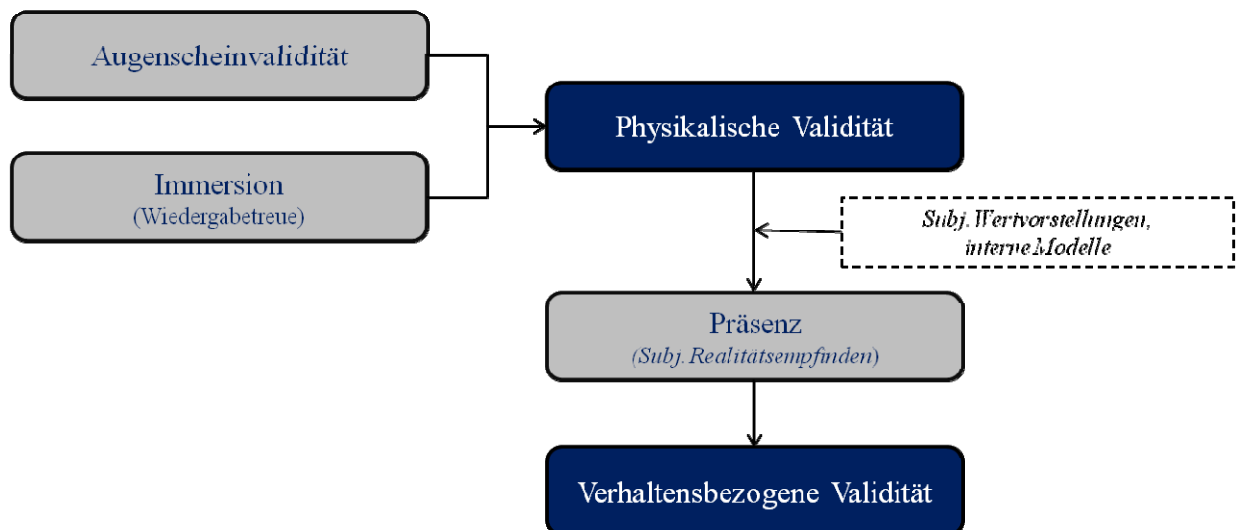


Abbildung 2.2: Begriffsverständnis.

Sowohl der physikalische als auch der fahrerverhaltensbezogene Aspekt sind für eine valide Untersuchung wichtig (Blana, 1996a). Folgt man der Meinung vieler Experten auf dem Gebiet der Validitätsanalytik, so stellt die verhaltensbezogene Korrespondenz - insbesondere in der human factors Forschung - den wichtigeren Validitätsaspekt dar (Reed & Green, 1995; Marberger, 2008; Blaauw, 1982; Blana, 1996a). „[...] No level of physical validity is useful

to human factors research if behavioral validity cannot be established“ (Godley, Triggs & Fildes, 2002, S. 590). Andere Wissenschaftler wie Wang et al. (2010) gehen sogar weiter und stufen physikalische Validität als nicht zwingend nötig ein, um Informationen über das Verhalten eines Menschen in einer gegebenen Situation zu erhalten. Unabhängig von der Bedeutung einer ausreichenden physikalischen Korrespondenz gilt jedoch eine ausreichende verhaltensbezogene Validität zweifelsfrei als zwingende Voraussetzung, um Ergebnisse aus Simulatorversuchen auf die Realität übertragen zu können (Marberger, 2008).

Entsprechend liegt auch im Rahmen dieser Ausarbeitung das Augenmerk auf der Verhaltensvalidität; die physikalische Validität wird als gegeben angenommen und nur am Rande diskutiert.

Im nächsten Schritt wird die Methodik zur Validierung eines Fahrsimulators näher beleuchtet.

2.2.2 Methodik

Blaauw (1982) stellt vier Methoden zur Beurteilung der Fahrerverhaltensvalidität eines Simulators vor und verweist dabei auf die bereits von Brown (1975) vorgestellte Möglichkeit der Validitätsanalyse von Flugsimulatoren:

- Vergleich zweier Systeme bzgl. deren Performance (Systemoutput wie z. B. die Fahrbahnposition) und/ oder des Fahrerverhaltens (z. B. der Lenkradwinkel) bei identischer Aufgabe und Bedingung,
- Messung der physischen und/ oder mentalen Beanspruchung durch Analyse physiologischer Variablen
- Subjektive, mittels Fragebögen erhobene Bewertung durch den Fahrer (z. B. Aufgabenschwierigkeitsgrad)
- Evaluation des Transfers von Trainingseffekten vom Simulator auf ein Realfahrzeug

Der Ansatz, die Versuchsergebnisse aus einem Simulatorversuch mit denen eines Realversuchs unter identischen Bedingungen zu vergleichen, ist allen genannten Methoden immanent (Blaauw, 1982). Dieser Untersuchungsansatz, der ursprünglich für den Bereich der Flugsimulatoren entwickelt wurde, lässt sich auch auf Fahrsimulatoren übertragen, da es sich gleichermaßen um ein Mensch-Maschine-System handelt und dem Menschen die Aufgabe der gezielten Steuerung des Systems obliegt.

Die Fahrerverhaltensvalidität lässt sich bei einer vergleichenden Betrachtung von Performancedaten aus realen und simulierten Fahrversuchen, was auch als die Goldstandard-Methode bezeichnet wird (Reimer et al., 2006), weiter differenzieren in absolute, relative oder keine Validität (Reed & Green, 1995; Blaauw, 1982). Vorausgesetzt wird hierbei eine möglichst gleiche Experimentedurchführung. Ein Simulator gilt als **absolut valide**, sofern die ermittelten Kennwerte der Fahrerperformance in beiden Experimenten identische oder nahezu identische Werte aufweisen (Blana, 1996a; Reed & Green, 1995). Eine statistische Überprü-

fung darf also keinen signifikanten Unterschied zwischen den Performancedaten beider Untersuchungsumgebungen ergeben. Sind die ermittelten Performancewerte verschieden, weisen jedoch dieselbe Tendenz auf, spricht man von **relativer Validität** (Blana, 1996a; Reed & Green, 1995). Unterscheiden sich die Performancewerte hingegen signifikant, ist keine Validität gegeben.

Dabei bleibt herauszustellen, dass die Gewährleistung absoluter Validität mit großem Aufwand verbunden ist und zudem oft bestimmte Randbedingungen voraussetzt. Die Notwendigkeit absolut valider Simulatoren ist jedoch nicht immer gegeben. So kann eine vergleichende Untersuchung bzw. Analyse verschiedener Fahrerassistenzsysteme oft in zufriedenstellendem Maße aus einem relativ validen Fahrsimulator gewonnen werden. Bei einer Untersuchung des Fahrerverhaltens als Funktion von Fahrzeugverhalten, Verkehrssituation oder Sichtbedingungen hingegen ist das Vorhandensein absoluter Validität von Nöten (Kemeny & Panerai, 2003). Generell liefert absolute Validität eine allgemeingültigere Aussage und gilt damit als erstrebenswert (Abendroth et al., 2012). Entsprechend liegt auch der Fokus dieser Arbeit auf der Überprüfung absoluter Validität des Fahrerverhaltens.

Im Folgenden wird auf die bereits angesprochenen Einflussfaktoren auf die Fahrerverhaltensvalidität eingegangen. Hieraus leiten sich wichtige Erkenntnisse dazu ab, welche Faktoren bei einer Validitätsuntersuchung eine Rolle spielen und durch eine gezielte Veränderung Einfluss auf die Validitätsergebnisse nehmen können.

2.2.3 Einflussfaktoren

Zur Analyse von komplexen Zusammenhängen in Arbeitssystemen bietet sich das erweiterte Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert (1984) als sinnvolles Instrumentarium an. Es dient in seiner Grundform dem Beurteilen menschlicher Arbeit; hierbei bilden die aus einem Arbeitsvollzug resultierenden, personenunabhängigen Belastungen und die sich daraus ableitenden individuellen Beanspruchungen des Menschen einen Ursache-Wirkungs-Komplex (Rohmert, 1984). Das Konzept richtet sich klassischerweise auf den Arbeitskontext aus, kann jedoch auch auf Fahrsituationen übertragen werden. Abbildung 2.3 zeigt eine Übertragung des Modells auf das System Fahrer-Fahrsimulator.

Aus dem jeweiligen **Untersuchungsziel**, welches mit einem Fahrversuch verfolgt wird, leiten sich die Wahl der Untersuchungsumgebung sowie weitere Belastungsfaktoren für den Menschen als Probanden dieser Versuchsreihe ab. Der Begriff der **Belastung** (engl. stress) fasst alle Einflüsse zusammen, die von außen auf den Menschen zukommen (DIN EN ISO 10075 – 1, 2000). Bezogen auf die Fahrzeugführung handelt es sich bei allen aus der Umwelt und dem Fahrzeug auf den Menschen einwirkenden Faktoren, die ihn in seiner Verhaltensweise als Fahrzeugführer beeinflussen, um Belastungsfaktoren (Schneider, 2009). Es kann zwischen aufgabenbezogenen und umgebungsbezogenen Ursachen unterschieden werden.

Im Bereich der **aufgabenbezogenen Ursachen** sind der Fahrauftrag, eine potentielle Nebenaufgabe, das Untersuchungsszenario (inkl. Verkehrssituation), die Verkehrsdichte und die Gestaltungsparameter des Fahrsimulators zu nennen. Durch die Festlegung der Verkehrssituationen und somit der Gestaltung der Szenarien ergeben sich Belastungsfaktoren für den Probanden. Auch die Verkehrsdichte hat als belastender Faktor eine unmittelbare Wirkung auf die Fahrzeugführung und somit auf den Fahrer. Zudem setzt eine Fahrversuchsreihe einen präzise formulierten Fahrauftrag voraus, um gewährleisten zu können, dass alle Probanden die Versuchsstrecke auf gleiche Weise durchfahren. Eine gängige Anweisung in diesem Zusammenhang ist der Fahrauftrag „wie immer zu fahren“, um so letztlich eine möglichst realitätsnahe Fahrsituation zu erzielen. Als Besonderheit einer simulierten Untersuchungsumgebung und somit des Einsatzes eines Fahrsimulators ist der Belastungsfaktor Gestaltungsparameter eines Fahrsimulators zu nennen. Hier ergibt sich, verglichen mit den festen Grundaufbauten von Realfahrzeugen, eine deutlich höhere Gestaltungsvielfalt. Im Gegensatz zum Untersuchungsszenario, welches durch die zugrundeliegende Fragestellung der Studie determiniert ist, werden die Gestaltungsparameter des Fahrsimulators nicht direkt festgelegt, sondern gelten in der Regel durch den jeweils vorhandenen Fahrsimulatorenbau als gegeben.

Im Bereich der **umgebungsbezogenen Ursachen** sind Temperatur, Beleuchtung, Lärm, Unterhaltungen mit Mitfahrenden, Straßenzustand und Witterungsverhältnisse zu nennen, die ebenfalls belastend auf den Fahrer einwirken können.

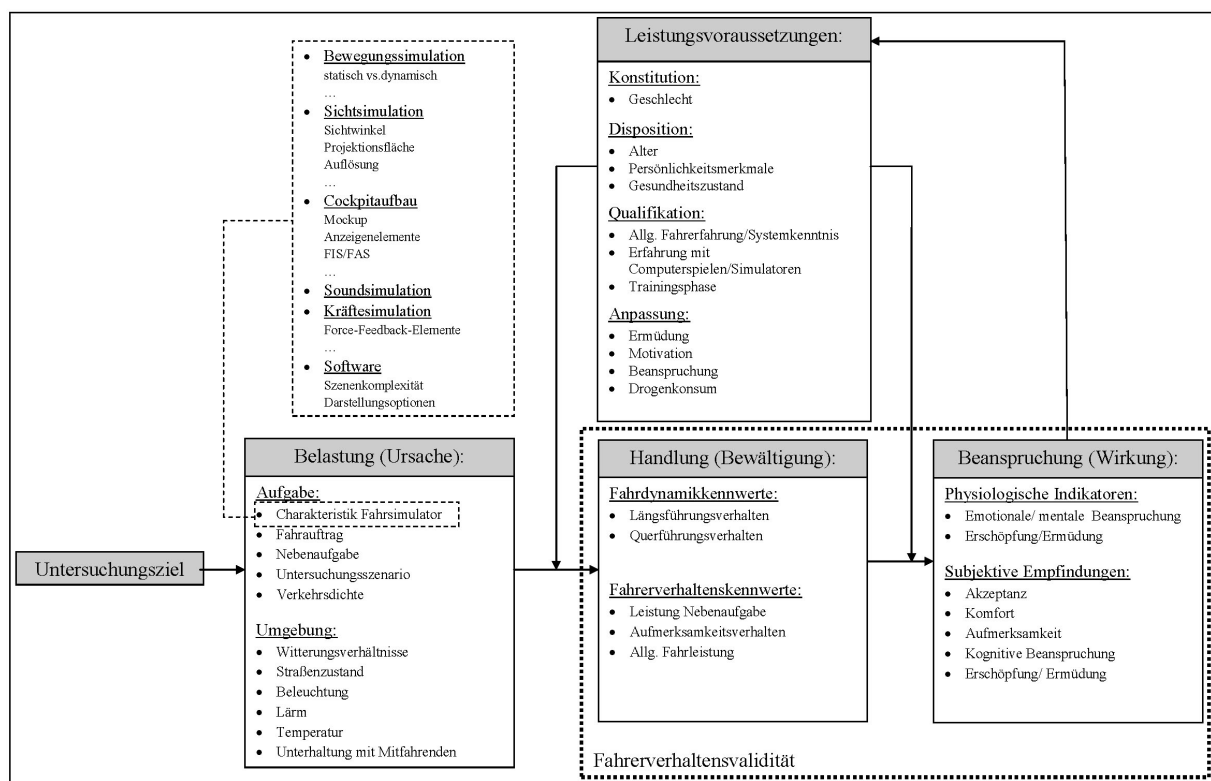


Abbildung 2.3: Kontextspezifische Erweiterung des Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts nach Rohmert (1984) (in Anlehnung an Zöller, Diederich, Abendroth & Bruder, 2013)

Auf die auf ihn einwirkende Belastung reagiert der Mensch zur Bewältigung mit einer **Handlung**. Handlungen gelten als eine spezielle Form des Verhaltens (Retz-Schmidt, 1992). Diese Handlung kann zum einen direkt beobachtet und in Form von Fahrerverhaltenskennwerten gemessen werden. Zu nennen sind hier die allgemeine Fahrleistung, wie beispielsweise das ausreichend lange Anhalten an einem Stoppschild oder die Nichtüberschreitung der Fahrstreifenmarkierungen, die Leistungen im Falle des Abprüfens einer fahrfremden Nebenaufgabe sowie das Aufmerksamkeitsverhalten. Zum anderen lässt sich auch indirekt durch fahrzeugbezogene Kennwerte auf das Fahrerverhalten schließen. Unterschieden werden können hier Längsführungskennwerte (Gaspedalstellung, Geschwindigkeit, TTC, etc.) und Querführungskennwerte (Lenkradwinkel, Gierrate, Querschleunigung, etc.). Beide Kategorien der Handlung bieten sich gemäß der Validierungsmethodik von Brown (1975) zur Bestimmung der Fahrerverhaltensvalidität an.

Es gibt weitere **individuelle Faktoren**, die ihrerseits eine mediierende Wirkung auf die Handlung und Beanspruchung des Individuums und somit letztlich auch auf die Fahrerverhaltensvalidität haben. Je optimaler die individuellen Voraussetzungen im Hinblick auf die konkrete Belastung sind, desto weniger anstrengend ist die Ausführung einer Handlung und desto geringer beansprucht wird ein Mensch. Diese positiven Effekte lassen sich bspw. durch gezieltes Training und Übung sukzessive verstärken; es kommt zur Anpassung der individuellen Leistungsvoraussetzungen (Breuer, 1996). Es gibt jedoch auch negative Einflüsse, die die Beanspruchung verstärken; Ermüdung oder Krankheit wären Beispiele. Individuelle Leistungsvoraussetzungen im Kontext der Fahrzeugführung sind gemäß Breuer, Rohmert, Breuer & Bielaczek (1996) folgende Kategorien: Konstitutionen, Dispositionen, Qualifikationen und Anpassungen. Im Vergleich hierzu unterscheiden andere Quellen, wie Rohmert (1984), zwischen Eigenschaften, Fähigkeiten und Fertigkeiten im Hinblick auf einen allgemeinen Arbeits- oder einen Fahrzeugführungskontext.

Aus der auf den Probanden einer Fahrsimulatorstudie einwirkenden Belastung ergibt sich in Abhängigkeit der individuellen Leistungsvoraussetzungen letztendlich die Höhe der Beanspruchung. Unter **Beanspruchung** (engl. strain, workload) wird gemäß dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept von Rohmert (1984) die bei einem im Arbeitssystem involvierten Individuum hervorgerufene psychische und physische Reaktion auf die von außen einwirkende physikalische und informatorische Belastung verstanden (Schlick, Bruder & Luczak, 2010). Die physische Beanspruchung beschreibt ihrerseits die Wirkung einer Belastung auf den Muskelapparat und das Kreislaufsystem eines Menschen. Psychische Beanspruchung lässt sich weiter unterteilen in einen emotionalen und einen mentalen Aspekt (Schmidtke, 1993). Sowohl physische als auch psychische Beanspruchung kann über physiologische Indikatoren wie die Herzschlagrate oder den Hautleitwert gemessen werden. Folgt man der Methodik von Brown (1975), bieten sich zur Bestimmung der Fahrerverhaltensvalidität sowohl physiologische Indikatoren als auch subjektive, von den Probanden selbst eingestufte Emp-

findungen an. Die Übereinstimmung der Beanspruchung ist genauso Bestandteil der Fahrer-verhaltensvalidität wie die Übereinstimmung der Handlung.

Nach dieser theoretischen Grundlagenaufbereitung im Bereich der Validitätsanalytik wird nun auf bisherige empirische Untersuchungen in diesem Bereich näher eingegangen.

2.3 Validierungsstudien

Eine nähere Betrachtung der Literatur zur Fahrsimulatorvalidität lässt einen Mangel an allgemeingültigen Validitätsuntersuchungen erkennen; die physikalische Validität findet hierbei noch deutlich häufiger Beachtung als die fahrerverhaltensbezogene (Blaauw, 1982). Die existierenden Studien zum verhaltensbezogenen Validitätsaspekt werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

2.3.1 Validierungsstudien im Überblick

Im Verlauf der Arbeit wird der Fokus nun auf die weniger vorhandenen Untersuchungsreihen zur Fahrerverhaltensvalidität gelegt. Infolgedessen ist der Einfachheit halber nur noch von der „Validität“ die Rede, sofern nichts Gegenteiliges erwähnt wird. Ferner wird der Begriff der „Validierungsstudie“ eingeführt, der Studien zur Fahrerverhaltensvalidität beschreibt, die Fahrversuche in Feld und Simulator oder in unterschiedlichen Fahrsimulatoren durchführten. Hierbei ist es unerheblich, ob absolute oder relative Fahrerverhaltensvalidität untersucht wurde. Generell finden sich jedoch mehr Studienergebnisse, die ein ausreichendes Maß an relativer Validität bestätigen, während absolute Validität meist als gering eingestuft wird (Törnros, 1998; Godley et al., 2002). Auch spielt es keine Rolle, wie die Forderung nach identischen Versuchsbedingungen, die in den Ausführungen von Brown (1975) nicht hinreichend determiniert wird, ausgelegt wurde.

In den nächsten Abschnitten erfolgt die Darstellung einiger Studien zur Fahrerverhaltensvalidität, die noch nicht in den Literaturübersichten von Blana (1996a), Hoskins & El Gindy (2006) oder Mullen, Charlton, Devlin & Bédard (2011) aufgeführt sind. Hierbei werden grundlegende Informationen zu den Versuchskonzepten gegeben. Eine Ergebnispräsentation findet anschließend in Kap. 2.3.7 statt, wobei hier exemplarisch Studien herausgegriffen sind, die die komplette Bandbreite möglicher Ergebnisse zu einzelnen Kennwerten wiedergeben. Diese Betrachtung kann auch Studien aus den Überblicken der genannten anderen Autoren enthalten, die hier nicht näher vorgestellt werden. Schließlich werden die bisherigen Forschungen kritisch hinterfragt, um Forschungslücken und -defizite aufzudecken.

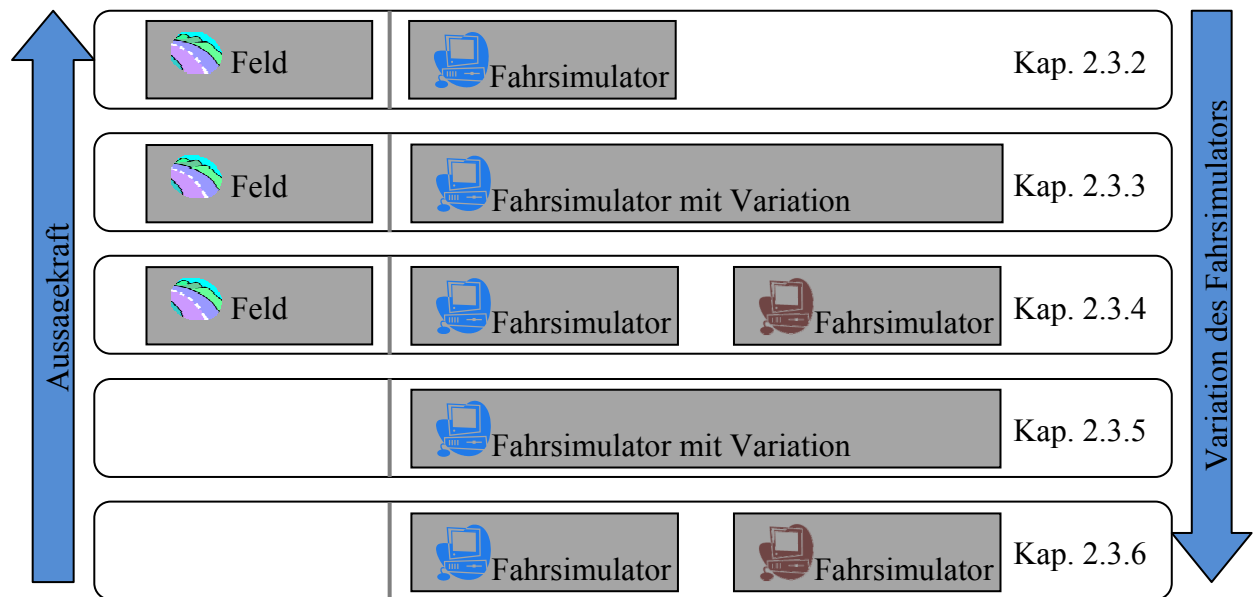


Abbildung 2.4: Gruppierung bisheriger Validierungsstudien anhand ihrer Aussagekraft und der Variation des Fahrsimulators.

Die vorhandenen Validierungsstudien lassen sich anhand ihrer Aussagekraft zur absoluten Validität spezifischer Fahrsimulatoren und anhand der Variationen der untersuchten Fahrsimulatorenaufbauten in fünf Gruppen einteilen (Abbildung 2.4). Als „klassisch“ angesehen werden können Studien, in denen die Ergebnisse aus identisch gestalteten Versuchen im Feld (öffentliche Straßen oder Testgelände) und in einem Fahrsimulator miteinander verglichen werden. Diese Art der Studien werden in Kapitel 2.3.2 vorgestellt. Sie liefern eine direkte Aussage zur absoluten Validität des untersuchten Fahrsimulators hinsichtlich der jeweils in der Untersuchung betrachteten Kennwerte. Als Erweiterung dieser Studienart können die in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Untersuchungsreihen gesehen werden. Hier finden neben den Versuchen im Feld und im Fahrsimulator weitere Untersuchungsreihen im Fahrsimulator statt, bei denen verschiedene Gestaltungsparameter variiert werden. Sofern nur ein ausgewählter Gestaltungsparameter variiert wird, kann eine eindeutige Aussage zum Einfluss dessen auf die absolute Validität getroffen werden. Jedoch gibt es auch Studien, die gleich mehrere Gestaltungsparameter verändern und so keine Zuordnung zwischen den Ergebnisänderungen und dem dafür verantwortlichen Gestaltungsparameter ermöglichen. Hier sinkt daher der Aussagegehalt zur absoluten Validität, während die betrachtete Variationsvielfalt des Fahrsimulators zunimmt. Die dritte Studienart (Kapitel 2.3.4) beinhaltet neben einem Feldversuch und einem Versuch in einem Fahrsimulator eine weitere Untersuchungsreihe, die in einem anderen Fahrsimulator durchgeführt wird. Hier ergibt sich eine ähnliche Problematik wie bei den zuvor geschilderten Studien hinsichtlich der eindeutigen Zuordnung von Gestaltungsparameter-Einflüssen auf die Fahrerverhaltensvalidität, da sich verschiedene Fahrsimulatoren hinsichtlich mehrerer Parameter unterscheiden können. In Kapitel 2.3.5 und Kapitel 2.3.6 schließlich werden Studien vorgestellt, die keine Feldversuche durchführen und somit keinen Bezugswert liefern, an dem die absolute Validität gemessen werden kann. Aus diesen Studien,

die entweder Versuche an verschiedenen Fahrsimulatoren oder aber eine Variation der Gestaltungsparameter an einem Fahrsimulator vornehmen, können lediglich Ergebnisse zur relativen Validität gewonnen werden.

Sofern bei der folgenden Darstellung der Studien kein ausdrücklicher Hinweis erfolgt, ist die Beschreibung der Versuchsstrecke für die reale und simulierte Untersuchungsumgebung gültig. Für jeden Fahrsimulator werden Informationen zur Bewegungssimulation sowie zum Sichtwinkel² horizontal angegeben. Dabei bezieht sich die Winkelangabe jeweils auf die vorhandene Frontsicht, sofern der beschriebene Fahrsimulator nicht über eine Rundumsicht von 360° verfügt. Die Vorstellung der Forschungsarbeiten erfolgt jeweils in alphabetischer Reihenfolge der Erstautorennamen.

2.3.2 Validierungsstudien mit Feld- und Fahrsimulatorversuch

Zunächst werden „klassische“ Validierungsstudien mit Feld- und Fahrsimulatorversuch vorgestellt (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Validierungsstudien mit Feld- und Fahrsimulatorversuch.

Eine Studie von **Abendroth et al. (2012)** verglich das Fahrerverhalten aus einer Untersuchungsreihe in einem statischen STISIM-Fahrsimulatorenbau (ca. 43° FOV horizontal) (N = 41 Probanden) mit zwei vergleichbaren Feldversuchen (N = 27 bzw. N = 13 Probanden), um Bahnführungskennwerte im Hinblick auf ihre Validität zu untersuchen. Gemessen wurden hierbei auf einer Autobahnstrecke in beiden Untersuchungsumgebungen die Geschwindigkeitsüberschreitung (Differenz aus der aktuellen und der zulässigen Geschwindigkeit), die maximale Querbeschleunigung während eines Lane-Change-Tests sowie die Blickbewegung der Probanden.

Eine Untersuchungsreihe im Feld und in einem dynamischen VTI III-Fahrsimulator (120° FOV horizontal) führten **Ahlström et al. (2012)** mit N = 24 Probanden durch, um neue Simulationsmodelle zu validieren. Als Szenarien kamen drei Streckenabschnitte unterschiedlicher Ebenheiten auf Bundesstraßen, bebauten Geländen sowie Feld-/Waldpassagen vor. Gemessen wurden objektive Kennwerte wie die Geschwindigkeit, die laterale Position und Beschleunigung, aber auch subjektive Empfindungen zum Komfortlevel, zur Gelassenheit und Ruhe (über Fragebögen).

Bengler, Bernasch & Löwenau (1996) führten eine Versuchsreihe auf einer Realstrecke und im statischen BMW-Fahrsimulator (42° FOV horizontal) durch, bei der die Probanden auf einer zweistreifigen, kurvigen Teststrecke zu fahren hatten. Aufgezeichnet wurde die Blickstrategie der N = 7 Probanden.

Boer, Girshick, Yamamura & Kuge (2000) führten ihre Feld- und Simulatorversuchsreihe am dynamischen Nissan-Fahrsimulator (120° FOV horizontal) mit N = 6 Probanden durch, um die Fahrerverhaltensvalidität zu erforschen. Die Versuche fanden auf einer Teststrecke statt; der Fokus lag auf dem Anhalten an einer Stopplinie und dem Durchfahren einer scharfen Kurve. Im Bereich objektiver Kennwerte wurde u. a. laterale Abwei-

² Der Sichtwinkel beschreibt die Größe des Sichtfelds eines Fahrsimulators und wird künftig mit der englischen Bezeichnung „field of view“, kurz FOV, abgekürzt.

chung, Abstand zur Stopplinie, Zeit und Abstand bei Kurveneintritt, Geschwindigkeit, Beschleunigung sowie die Kennwerte eines Lenkradsensors und Pedalsensors gemessen.

Als weitere Studie bestehend aus Feld- und Simulatorversuchsreihe ist die Validierungsstudie von **Brown (2012)** zu nennen, die mit N = 10 Probanden am dynamischen Oregon State University Fahrsimulator (180° FOV horizontal) stattfand. Als Versuchsstrecke dienten viel befahrene städtische und ländliche Abschnitte in Oregon. Als Kennwerte wurden Geschwindigkeit, Beschleunigung sowie Blickbewegung aufgezeichnet.

Chanton, Sauvage, Kassaagi & Coratte (2002) untersuchten Fahrerverhalten in Gefahrensituationen und führten hierzu identisch gestaltete Feld- und Simulatorfahrten mit N = 150 bzw. N = 124 Probanden durch, um die Fahrerverhaltensvalidität des dynamischen RENAULT-Fahrsimulators (150° FOV horizontal) zu untersuchen. Als Versuchsstrecke diente eine Teststrecke, die in einer nassen oder eisigen Kurve endete. Als Kennwerte wurden Pedalwege, Lenkradwinkel, Driftwinkel, Roll- und Giergeschwindigkeit, Fahrgeschwindigkeit sowie die laterale und longitudinale Beschleunigung gemessen. Auch ein Fragebogen zur Abfrage der Gefühle in der Gefahrensituation kam zum Einsatz.

Eine weitere Studie wurde von **Devos et al. (2013)** durchgeführt. Neben einer Feldstudie wurden Simulatorversuche an einem statischen STISIM-Fahrsimulator (keine Angaben zum FOV horizontal) durchgeführt. Die Feldversuche fanden auf vorstädtischen Gebieten mit moderatem Verkehr, Landstraßenpassagen und einer 6-streifigen Autobahn statt; diese Strecke wurde im Simulator ähnlich nachgebaut. Verglichen wurde das Fahrerverhalten der N = 29 Probanden mit Huntington-Erkrankung anhand einer Fahrfähigkeitscheckliste.

De Valck, Quanten, Cluydts & Berckmanns (2006) führten zwecks Fahrerverhaltensvalidierung ebenfalls Versuche in realer und simulierter Umgebung durch und untersuchten den Unterschied zwischen Nacht- und Tagfahrten. Als simulierte Untersuchungsumgebung stand der statische York Fahrsimulator (keine Angaben zum FOV horizontal) zur Verfügung. Die Versuchsstrecke beinhaltete eine 800 km lange Autobahnstrecke, die von den N = 9 identischen Probanden einmal tagsüber und einmal nachts zu befahren war. Während des Versuchstags wurde die Müdigkeit mittels des POMS-Fragebogens zur Erfassung der subjektiven Müdigkeit (Profile of Mood States, basierend auf McNair, Lorr & Droppelman, 1971) und über physiologische Daten (EEG, EOG und ECG) gemessen. Zudem wurden im Feld die Lenkradposition und Geschwindigkeit gemessen. Bei der Fahrsimulatorfahrt wurden die Spurposition³, die Geschwindigkeit und die Unfallhäufigkeit dokumentiert.

Engen (2008) verglich in seiner Validierungsstudie die Ergebnisse aus Datenaufzeichnungen im realen Straßenverkehr (Videoaufnahme) bzw. aus Fahrten in einem Testfahrzeug mit einer Untersuchungsreihe am dynamischen NTNU/SINTEF Fahrsimulator (180° FOV horizontal). Insgesamt drei verschiedene Versuchsstrecken bzw. Szenarien wurden abgeprüft. Zum einen war eine ländliche Umgebung mit kritischen Fahrsituationen zu passieren; im Rahmen dieser Studie wurde die Reaktionszeit von N = 21 erfahrenen Probanden und N = 60 Studenten im Fahrsimulator aufgezeichnet und mit der Feldbeobachtung verglichen. Ebenfalls auf einer ländlichen Strecke, jedoch mit unterschiedlichen Fahrstreifenbreiten, wurden die Geschwindigkeit und die laterale Position von N = 29 Probanden im Fahrsimulator erfasst und wiederum mit der Datenaufzeichnung im realen Straßenverkehr verglichen. Die dritte Versuchsstrecke war identisch mit der zweiten, hier war jedoch zeitweise ein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden, welches schwer überholt werden konnte. Gemessen wurde die Zeitlücke der N = 14 Probanden beim Folgen des vorausfahrenden Fahrzeugs; als Vergleichsdaten standen in diesem Fall die mit einem Testfahrzeug gemessenen Werte von N = 4 Probanden zur Verfügung.

³ Die Spurposition als feststehender Begriff beschreibt in der Regel die Position des Fahrzeugs im Fahrstreifen.

Auch **Guzek, Jurecki, Lozia & Stanczyk (2006)** führten Feld- und Fahrsimulatorversuche durch, um das Fahrerverhalten in kritischen Situationen (plötzlich erscheinendes Fahrzeug) miteinander zu vergleichen. Als simulierte Untersuchungsumgebung kam der statische AutoPW-Fahrsimulator (keine Angaben zum FOV horizontal) zum Einsatz. Von den N = 30 Probanden wurden in beiden Untersuchungsumgebungen die Häufigkeit des Wählens eines bestimmten Manövers sowie Kennwerte wie die Risikozeit (Zeit zwischen dem Erkennen des Fahrzeugs und der potentiellen Kollision) und die Reaktionszeit (Zeit zwischen Erscheinen des Fahrzeugs und der Handlung des Probanden) aufgezeichnet.

Hirata, Yai & Takagawa (2007) untersuchten das Fahrerverhalten im Rahmen einer Feld- und einer Simulatorstudie am dynamischen MOVIC-T4 Fahrsimulator (360° FOV horizontal, mit Head-mounted Display, HMD). Ziel war es, die Validität kleiner und portabler Simulatoren für Verkehrssicherheitsuntersuchungen auf unterirdischen städtischen Autobahnen zu untersuchen. Die N = 10 Probanden hatten einen Autobahnabschnitt zu passieren und sollten dabei verschiedene Geschwindigkeiten bei verdecktem Tachometer sowie auch verschiedenen Abstände zum Vorfahrenden einhalten. Dabei wurden Geschwindigkeit, Beschleunigung, Abstand sowie Hautleitwert und Herzschlagrate dokumentiert.

Jamson & Smith (2002) untersuchten das Fahrerverhalten von N = 12 identischen Probanden in realer und simulierter Untersuchungsumgebung. Die Simulatorstudie fand am statischen Leeds Fahrsimulator (2,5 m zylindrische Projektionsfläche, keine Angaben zum FOV horizontal) statt. Auf einer Teststrecke wurden verschiedene Bremssystemeinstellungen getestet. Als objektive Kennwerte wurden die Bremskraft, der Pedalweg, die Geschwindigkeit, Beschleunigung und physiologische Daten (EMG, EDA, ECG) aufgenommen.

In der Validierungsstudie von **Johnson et al. (2011)** wurden Versuche mit N = 9 Probanden im Feld und am statischen STISIM-Simulator (135° FOV horizontal) durchgeführt. Die Probanden absolvierten eine typische Fahrprüfungsfahrt, deren Strecke im Fahrsimulator nachgestellt wurde. Dabei wurden ihr Sauerstoffverbrauch, die Sauerstoffzufuhr sowie die Herzfrequenz ermittelt.

Krause, Yilmaz & Bengler (2014) untersuchten einen Ampelsignal-Assistenten in realer und simulierter Umgebung, indem sie die Geschwindigkeitswahl, die Beschleunigung, den Schadstoffverbrauch und eine subjektive Beurteilung der N = 20 Probanden über den NASA-RTLX erhoben. Für das Geschwindigkeitsverhalten wurde dabei als Maß die mit mind. 5 km/h Geschwindigkeitsüberschreitung zurückgelegte Distanz erhoben. Neben Landstraßenabschnitten wurde das Assistenzsystem auch Innerorts getestet, wobei die innerstädtische Versuchsstrecke im Fahrsimulator nicht der realen Strecke nachgebildet wurde. Als Fahrsimulator kam ein statischer Simulator mit BMW Mockup (180° FOV horizontal) zum Einsatz.

Leclerc, Petit, Mollard & Collet (2008) untersuchten das Bremsverhalten und die mentale Beanspruchung im Rahmen identisch gestalteter Feld- und Simulatorversuche. Dabei wurde auf den dynamischen Cards2 Fahrsimulator (150° FOV horizontal) zurückgegriffen. Die Versuche fanden mit N = 16 Probanden auf einer Teststrecke statt, auf der die Probanden mehrmals bremsen sollten. Aufgezeichnet wurden der Zeitpunkt des Bremsbeginns, die Bremsvorgangsdauer, der Abstand zum Frontfahrzeug sowie die durchschnittliche Verzögerung. Neben diesen verhaltensbezogenen Größen wurden physiologische Daten (ohmic perturbation duration Index, kurz OPD Index, als elektrodermalen Kennwert, der die Dauer angibt, die ein Proband auf einen Stimulus reagiert und entsprechend nicht zu seinem ursprünglichen tonischen Level zurückkehrt) und eine subjektive Einstufung der Aufgabenschwierigkeit mittels eines Fragebogens erhoben.

Lee (2003) verglich die Ergebnisse einer Feldstudie, bei der die Probanden mit dem eigenen Auto unterwegs waren, mit den Ergebnissen einer Fahrsimulatorstudie an einem statischen STISIM Fahrsimulator (keine Angaben zum FOV horizontal). N = 129 ältere Probanden nahmen an beiden Versuchen teil. Die Versuchsstrecke bestand aus einem Rundkurs im realen Straßenverkehr. Dokumentiert wurde bei den Versuchen die Fahrperformance der Probanden (Geschwindigkeit, Regelbeachtung, Schilderbeachtung, etc.), um daraus Indizes zu berechnen, die diese verschiedenen Verhaltensweisen gewichtet zusammenfassen und Aussagen über die Fahrleistung eines Probanden zulassen (Simulated Driving Index und Road Assessment Index).

Eine weitere Studie geht auf **Marberger (2008)** zurück. Es fanden Feldversuche sowie eine Versuchsreihe im dynamischen Fraunhofer IAO Fahrsimulator (180° FOV horizontal) statt, der über ein Bewegungssystem Sitz- und Körpervibrationen darstellen kann. Die N = 17 Probanden absolvierten eine zweistreifigen Autobahnstrecke sowie einen Abschnitt durch Wohngebiet und auf einer Teststrecke. Diese Strecke wurde im Fahrsimulator nachgebildet. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, bestimmte Geschwindigkeiten ohne Tachometerinformation einzuhalten, Bremsmanöver durchzuführen und kurvige Passagen zu absolvieren. Gemessen wurden Verhaltensgrößen wie die Geschwindigkeit, der Lenkradwinkel, die laterale Position des Fahrzeugs und die Bremsdauer. Die Probanden füllten zusätzlich einen Fragebogen zur Einschätzung ihrer Fahrperformance aus.

Mathur, Bham, Vallai & Leu (2010) zeichneten das Fahrerverhalten von Autofahrern innerhalb einer Baustelle auf. Anschließend führten sie Fahrversuche mit N = 46 Probanden am statischen Missouri S&T Fahrsimulator (120° FOV horizontal) durch, bei denen die Baustelle mit Fahrstreifenverengung auf einem Highway nachgebildet war. Aufgezeichnet wurden in beiden Untersuchungsumgebungen die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge. Zudem füllten die Probanden im Simulator einen Fragebogen zur Realitätsnähe aus.

Auch **Mayhew et al. (2011)** führten eine Validierungsstudie mit N = 64 jungen Probanden durch. Ziel war es, dass Fehlerverhalten von Fahrschülern im Fahrsimulator und im Realverkehr miteinander zu vergleichen. Möglichst identische Versuche fanden im Feld sowie im statischen STISIM Fahrsimulator (keine Angaben zum FOV horizontal) statt. Die Probanden absolvierten eine 15minütige Prüfungsfahrt mit max. 50 bis 60 km/h und verschiedenen schwierigen Passagen wie mehrstreifige Kreuzungen. Ein Experte begutachtete die Fahrfehler und Gefahrenantizipation.

Reimer & Mehler (2011) verglichen die kognitive Beanspruchung von N = 26 Probanden bei einer Realfahrt mit der einer Fahrsimulator-Vergleichsstudie von Mehler, Reimer, Coughlin & Dusek (2009), die an einem statischen Fahrsimulator (40° FOV horizontal) mit N = 121 Probanden stattfand. Die Probanden befuhren eine Autobahnstrecke und absolvierten Nebenaufgaben. Neben der Leistung und der Zeit für die kognitive Nebenaufgabe wurden die Herzfrequenz und die Hautleitfähigkeit gemessen.

Shechtman et al. (2009) nahmen einen Vergleich zweier vorhandener Studien (Classen et al., 2007, Shechtman et al., 2007) mit N = 39 identischen Probanden vor. Die Simulatorversuche von Shechtman et al. (2007) fanden dabei am statischen STISIM M500W Fahrsimulator (180° FOV horizontal) statt. Die Versuchsstrecke bestand aus städtischen Kreuzungen mit Links- und Rechtsabbiegen. Die Fahrfehler wurden von Experten beurteilt.

Ebenfalls eine Validierungsstudie geht auf **Senserrick, Brown, Quistberg, Marshall & Winston (2007)** zurück. Diese Untersuchung zum Verhalten von N = 21 Teenagern fand am dynamischen NADS Fahrsimulator (keine Angaben zum FOV horizontal) statt und beinhaltete drei ländliche Streckenabschnitte, die in beiden Umgebungen ähnlich gestaltet waren. Gemessen wurde lediglich die Geschwindigkeit der Probanden.

Stanton, Young, Walker, Turner & Randle (2001) führten ebenfalls Feld- und Simulatorversuche durch. Die Versuchsstrecke, die 15 Meilen Autobahn beinhaltete, wurde im Feld und im statischen Southampton Fahrsimulator (eine Projektionsfläche, keine Angaben zum FOV horizontal) gefahren. Die N = 12 Probanden erfüllten eine Nebenaufgabe, deren Performance gemessen wurde. Zusätzlich wurde über den Driver Coping Questionnaire (basierend auf Matthews, Desmond & Joyner, 1995) der Fahrstil der Probanden ermittelt; er fasst die vier Aspekte des aufgabenbezogenen Verhaltens, des emotionsbezogenen Verhaltens, der Aufarbeitung und der Vermeidung zusammen.

Die Studie von **Wang et al. (2010)** untersuchte den Einfluss verschiedener Eingabemethoden eines Informationssystems auf die Fahrperformance und bestand aus Versuchen im Feld sowie einer Fahrversuchsreihe am statischen MIT AgeLab Fahrsimulator „Miss Daisy“ (40° FOV horizontal). Bei der Feldstudie kamen N = 28 Probanden und im Simulator N = 30 Probanden zum Einsatz. Als Versuchsstrecke diente eine zweistreifige (Fahrsimulator) bzw. dreistreifige (Feld) Autobahnstrecke. Die Probanden erfüllten zusätzlich eine Nebenaufgabe. Die Reaktionszeit bis zum Beginn der Nebenaufgabe wurde ebenso gemessen wie die mittlere Aufgabendauer, die Blickbewegung, die Geschwindigkeit sowie die laterale Position.

Zöller, Yang, Abendroth & Bruder (2014) führten eine Validierungsstudie am statischen IAD Fahrsimulator (180° FOV horizontal) durch. Ziel der Untersuchung mit N = 39 Probanden im Feld und N = 45 Probanden im Fahrsimulator war die Erforschung von Nachtsichtverhältnissen in realer und simulierter Umgebung. Hierzu wurden entlang einer durch städtische und ländliche Passagen führenden Versuchsstrecke Fußgänger positioniert und die Blickbewegung aufgezeichnet.

Eine weitere Studie am IAD Fahrsimulator (180° FOV horizontal) von **Zöller et al. (2015a)** mit N = 45 Probanden untersuchte die Eignung eines statischen Fahrsimulators für kritische Bremsmanöver mit aktivem Bremsengriff. Hierzu wurden Versuche auf einem Testgelände sowie anschließend im Fahrsimulator durchgeführt. Aufgezeichnet wurden neben der Blickbewegung verschiedene Fahrdynamikdaten sowie das Fahrerverhalten mittels Videobeobachtung.

2.3.3 Validierungsstudien mit Feldversuchen und Variationen im Fahrsimulatorversuch

Im Folgenden wird auf Studien eingegangen, die neben einem Feld- und einem Fahrsimulatorversuch auch Variationen von Gestaltungsparametern im Fahrsimulator untersuchten (Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Validierungsstudien mit Feldversuch und Variationen im Fahrsimulatorversuch.

Brünger-Koch, Briest & Vollrath (2006) führten Versuche im Feld sowie im dynamischen DLR Fahrsimulator (keine Angaben zum FOV horizontal) mit N = 12 verschiedenen Probanden durch und variierten dabei Charakteristika der Bewegungssimulation. Die reale Versuchsstrecke bestand aus kurvigen Passagen mit vorgesehenen Bremspunkten. Im Simulator gab es neben einer kurvenreichen Strecke zwei Streckenabschnitte, die zum Bremsen aufforderten. Eine der Strecken entsprach einem Nachbau der realen Strecke. Sie wurden von den Probanden mit unterschiedlichen Parametereinstellungen des Motion Cueing Algorithmus befahren. Gemessen wurden u. a. Geschwindigkeit, laterale Position, Lenkradwinkel und subjektives Realitätsempfinden.

Jamson (2000) setzte an einer Validierungsstudie von **Blana (1999)** an und untersuchte das Fahrerverhalten bei erweiterter Sicht im Simulator. Blana (1999) führte mit N = 100 Probanden eine Studie im Feld und im statischen Leeds Fahrsimulator (50° FOV horizontal) auf einer einstreifigen, ländlichen Straße durch. Jamson (2000) ergänzte diese Untersuchungsreihe durch eine Studie mit N = 91 Probanden am Leeds Fahrsimulator mit erweiterter Sicht (120° FOV horizontal). Die Versuchsstrecke bestand in einer S-Kurve auf einstreifiger Landstraße. Gemessen wurden, wie in der Vorstudie, die Kennwerte Geschwindigkeit und Spurposition.

Jamson (2001) setzte seine Versuchsreihe aus dem Jahr 2000 fort (Jamson, 2000) und führte einen Versuch im statischen Leeds Fahrsimulator mit nochmal erweiterter Sicht durch (230° FOV horizontal). Gemessen wurden, wie zuvor, die Geschwindigkeit und die Spurposition in einer S-Kurve von N = 96 Probanden.

2.3.4 Validierungsstudien mit Feldversuch und Versuchen in verschiedenen Fahrsimulatoren

Neben Studien, die einzelne oder mehrere Gestaltungsparameter an einem Fahrsimulator variieren, gibt es ferner Validierungsstudien, die einen Vergleich zwischen einer Feldfahrt und verschiedenen Fahrsimulatoren vornahmen (Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: Validierungsstudien mit Feldversuch und Versuchen in verschiedenen Fahrsimulatoren.

Eine Untersuchungsreihe von **Chrysler, Cooper, McGehee & Yager (2013)** beinhaltete eine Feldstudie (N = 41 Probanden) sowie zwei Fahrsimulatorstudien (N = 40 Probanden je Studie). Dabei kamen der statische NADS-MiniSim Desktop Fahrsimulator (drei 19“ Bildschirme, keine Angaben zum FOV horizontal) sowie der statische RTI Simulator (drei 22“ Monitore, keine Angaben zum FOV horizontal) zum Einsatz. Als Versuchsstrecke wurde eine zweistreifige ländliche Straße mit Seitenstreifen in der simulierten Umgebung nachgebildet, während für die Feldversuche auf ein Testgelände zurückgegriffen wurde. Die Probanden hatten neben der eigentlichen Fahrzeugführung eine Nebenaufgabe zu bewältigen. Gemessen wurden Geschwindigkeit, Reaktionszeit, verpasste Ereignisse sowie Anteil falscher Antworten bei der Nebenaufgabe.

Engström, Johansson & Ostlund (2005) führten im Rahmen des HASTE-Projekts eine Untersuchungsreihe zum Einfluss visueller und auditiv/ kognitiver Belastung auf die Fahrperformance durch, die neben Feldversuchen zwei verschiedene Fahrsimulatoren als Untersuchungsumgebungen beinhaltete. Hierbei kamen zum einen der statische VTEC-Fahrsimulator (135° FOV horizontal) und zum anderen der dynamische VTI-Fahrsimulator (120° FOV horizontal) zum Einsatz. Als Versuchsstrecke stand eine zweistreifige Autobahn zur Verfügung, die sich in realer und simulierter Umgebung ähnelte, in den Fahrsimulatorstrecken jedoch auch kritische Situationen beinhaltete. Die Probanden (statischer Fahrsimulator: N = 48, dynamischer Fahrsimulator: N = 48, Feld: N = 24) hatten zudem Nebenaufgaben zu erfüllen. Aufgezeichnet wurden Kennwerte zur Längs- und Querkontrolle (Geschwindigkeit, laterale Position, time to line crossing, Lenkradrückstellrate) sowie physiologische Daten (Herzschlagrate, Hautleitfähigkeit). Auch die Blickbewegung der Probanden sowie eine Bewertung der eigenen Fahrperformance wurden dokumentiert.

Greenberg et al. (2006) führten zur Untersuchung des Verhaltens bei zeitkritischen Bremsungen und bei Ausweichmanövern zur Kollisionsvermeidung Fahrversuche in realer Umgebung sowie in zwei verschiedenen simulierten Umgebungen mit jeweils N = 72 Probanden durch. Die Versuche fanden an den dynamischen Fahr-

simulatoren NADS (360° FOV horizontal) und VIRTTEX (180° FOV horizontal) statt. Während bei den Feldversuchen eine zweistreifige Teststrecke zu befahren war, fanden die Simulatorversuche auf einer virtuellen, dreistreifige Autobahn statt. In beiden Umgebungen waren die Probanden kritischen Auffahrsituationen ausgesetzt, die es durch Bremsen oder Ausweichen zu vermeiden galt. Aufgezeichnet wurde die time to collision zum Handlungszeitpunkt (Bremsen oder Ausweichen).

2.3.5 Validierungsstudien mit Variationen im Fahrsimulatorversuch

Als weitere Gruppe finden sich Validierungsstudien, die ebenfalls einzelne oder mehrere Gestaltungsparameter eines Fahrsimulators variierten, dabei jedoch keine Feldversuche als Referenz durchführten (Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5: Validierungsstudien mit Variationen im Fahrsimulatorversuch.

Chatziastros, Wallis & Bühlhoff (1999) führten Versuche an einem statischen Fahrsimulator durch, um den Einfluss unterschiedlicher Sichtwinkel und horizontaler Positionierungen der Sichtfelder sowie der Oberflächenstruktur auf die Lenkperformance zu untersuchen. Zur Sichtsimitation im Fahrsimulator standen ein Monitor (40° FOV horizontal, 32 Pixel/°, sehr guter Kontrast) sowie eine Projektionsfläche (180° FOV horizontal, 14 Pixel/°, guter Kontrast) zur Verfügung. Jeweils N = 6 Probanden nahmen an dem Versuch teil. Die einstreifige Versuchsstrecke setzte sich aus verschiedenen geraden und kurvigen Abschnitten zusammen, die von den Probanden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 60,8 km/h durchfahren wurden. Als Kennwert wurde die absolute laterale Abweichung von der Fahrstreifenmitte dokumentiert.

Colombet et al. (2008) führten eine Versuchsreihe am dynamischen CARDS-Fahrsimulator (keine Angaben zum FOV horizontal) durch und variierten dabei die vorhandene Bewegungssimulation zwischen einer klassischen und einer adaptiven Algorithmuseinstellung sowie zwischen ausbleibender Bewegungskonstruktion. Aufgabe der N = 17 Probanden war es, einem vorausfahrenden Fahrzeug auf gerader Strecke mit einem Abstand von 15 m zu folgen. Als objektive Kennwerte wurden die Geschwindigkeit absolut sowie relativ zum Vorausfahrenden und die Längsbeschleunigung des Simulators gemessen. Das subjektive Realitätsempfinden der Probanden wurde abgefragt.

In der Studie von **De Winter, De Groot, Mulder, Wieringa & Dankelman (2008)** wurden sechs verschiedene low-cost Cueing Systeme an einem statischen Dutch Fahrsimulator (keine Angaben zum FOV horizontal) miteinander verglichen, die das fehlende vestibuläre Feedback ersetzen sollen: Gurtstraffer, steifer werdendes Bremspedal, vibrierendes Lenkrad, quietschender Reifen-Sound, vibrierender Sitz sowie Sitz mit Druckluft. Für die verschiedenen Systeme kamen unterschiedliche Probanden von N = 12 bis N = 31 zum Einsatz. Als Szenarien kamen ein Bremsexperiment auf gerader Strecke mit Kreuzungsbereich und Geschwindigkeitsvorgabe, das Fahren um 90° Kurven sowie eine Fahrt auf zweistreifiger Landstraße vor. Im Bereich objektiver Kennwerte wurden der Abstand zur Ziellinie bei Bremsbeginn und Stillstand, die Anzahl der Stopps, die Geschwindigkeit bei Bremsbeginn, die Bremsverzögerung, die Anzahl des Spurverlassens sowie die Spurabweichung und Geschwindigkeit in der Kurve aufgezeichnet.

Knappe (2009) führte Versuche zum Einfluss unterschiedlicher horizontaler FOV und Projektionsflächen am statischen BMW Fahrsimulator durch. Hierbei variierte sie die Sichtsimitation zwischen einer Projektion mit 135° FOV horizontal und einem Plasma-Bildschirm mit 96° FOV horizontal. Dabei wurde jeweils einmal die

gesamte Sichtfläche eingesetzt und einmal ein auf 5° begrenzter horizontaler FOV. Die Versuchsstrecke beinhaltete einen dreistreifigen Autobahnabschnitt. Die N = 25 Probanden hatten neben der eigentlichen Fahraufgabe Nebenaufgaben zu erfüllen. Dabei wurden die laterale Position, die time to line crossing, der Lenkradwinkel, die Lenkradrückstellrate sowie das subjektive Realitätsempfinden erhoben.

Liu & Chang (1995) führten Versuche am statischen CBR Fahrsimulator (60° FOV horizontal) durch und untersuchten dabei den Einfluss unterschiedlich parametrierter Lenkrad-Force-Feedback Lösungen auf das Fahrerverhalten. Die Versuche setzten sich aus drei Experimenten mit N = 12 identischen Probanden zusammen. Experiment eins und zwei verlangte von den Probanden, eine Strecke mit geraden und kurvigen Passagen in einer vorgegebenen oder frei wählbaren Geschwindigkeit zu durchfahren und die Spur zu halten. Das dritte Experiment sah vor, mit hoher Geschwindigkeit durch eine Kurve zu fahren, sodass das Fahrzeug ins Rutschen geriet; anschließend war die Kontrolle über das Fahrzeug wieder herzustellen. Aufgezeichnet wurde jeweils der Lenkradwinkel.

Eine frühe Studie von **McLane & Wierwille (1975)** untersuchte den Einfluss einer Bewegungs- und Soundsimulation bei Fahrten im dynamischen Virginia Tech Fahrsimulator (48° FOV horizontal) mit N = 48 Probanden. Dabei waren Fahrten auf einer teils geraden und teils kurvigen Straße mit vorgegebener Geschwindigkeit und Fahrstreifenwechsel zu absolvieren; zeitweise wurden Windböen simuliert. Aufgenommen wurden die laterale Position, die Gierrate, die Geschwindigkeit, die Lenkradrückstellrate und die Anzahl der Gaspedalbetätigungen größer einem gewissen Maß.

In der Studie von **Mourant & Sadhu (2002)** wurden Versuche am statischen Fahrsimulator der Northeastern University (57° FOV horizontal) durchgeführt, bei denen ein Federkraft-Lenkrad einer Force-Feedback-Lösung für das Lenkrad gegenübergestellt wurde. Getestet wurden diese Systeme von N = 8 Probanden auf einer kurvigen Straße und auf zwei Autobahn-Abfahrten. Hierbei galt es, nicht schneller als eine vorgegebene Geschwindigkeit zu fahren und den eigenen Fahrstreifen zu halten. Es wurden die Spurposition und die Geschwindigkeit aufgezeichnet und das Handling des Fahrzeugs mittels eines Fragebogens erhoben.

Ebenfalls Untersuchungen zum Einfluss bestimmter Fahrsimulatorparameter führten **Neimer & Mohellebi (2009)** durch. Ziel war es zu analysieren, inwiefern hinsichtlich der visuellen Informationswahrnehmung unterschiedliche Probanden zur Einschätzung der Validität herangezogen werden können. Im Rahmen dieser Studie fuhren die N = 32 Probanden im dynamischen INRETS MSIS SIM2 (156° FOV horizontal). Verglichen wurden sechs Einstellvarianten der Bewegungssimulation hinsichtlich der Neigung und Längsverschiebung. Die Probanden hatten einem vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen, das verzögerte und beschleunigte. Gemessen wurden Geschwindigkeit und Beschleunigung des Vorausfahrenden sowie des Egofahrzeugs, Bremsdruck und Bremsung des Egofahrzeugs. Daraus wurden der Abstand zum Vorausfahrenden, die Reaktionszeit sowie die time to collision berechnet. Zudem wurde die von den Probanden favorisierte Simulatoreinstellung erfragt.

Owens & Tyrell (1999) führten Versuche am statischen UMTRI Fahrsimulator (25° FOV horizontal) durch und untersuchten dabei den Einfluss verschiedener Bildschärfen und Leuchtdichten sowie eines Tunnelblicks. Die N = 9 Probanden hatten Lenkeingaben zu tätigen und das Fahrzeug in der Spur zu halten. Dokumentiert wurden die laterale Position, die Anzahl des Fahrstreifenverlassens sowie die Bailey-Lovie wall charts für die Bildauflösungsschärfe.

2.3.6 Validierungsstudien mit Versuchen in verschiedenen Fahrsimulatoren

Im Gegensatz zu den eben vorgestellten Validierungsstudien werden im Folgenden Untersuchungen vorgestellt, die verschiedene Fahrsimulatoren miteinander verglichen, jedoch wiederum keine Feldversuche durchführten (Tabelle 2.6).

Tabelle 2.6: Validierungsstudien mit Versuchen in verschiedenen Fahrsimulatoren.

Im Rahmen einer Studie von **Bengler, Praxenthaler, Theofanou & Eckstein (2004)** wurden der Einfluss eines Bewegungssystems und des vertikalen Sichtwinkels auf das Fahrerverhalten während der Ausführung einer Nebenaufgabe untersucht. Es kamen in zwei Untersuchungsreihen der statische BMW-Fahrsimulator (52° FOV horizontal) sowie der dynamische Daimler-Simulatoraufbau (180° FOV horizontal) zum Einsatz. Die N = 20 Probanden (BMW Fahrsimulator) bzw. N = 79 Probanden (Daimler Fahrsimulator) folgten einem vorausfahrenden Fahrzeug auf Landstraße und Autobahn. Aufgezeichnet wurden objektive Kennwerte wie die Blickbewegung, die laterale Position, der Abstand zu einem Vorausfahrenden, der Lenkradwinkel und die Geschwindigkeit. Zudem wurden die Probanden nach dem subjektiv empfundenen Workload und dem Ablenkungspotential befragt. Obgleich diese beiden Versuchsreihen primär unabhängig voneinander durchgeführt wurden, findet sich abschließend ein Vergleich der Ergebnisse in der Studie.

In der Studie von **Jamson & Jamson (2010)** fanden Fahrversuche zur Analyse der Ablenkung durch Nebenaufgaben an zwei verschiedenen statischen Fahrsimulatoren statt: Leeds Labsim (50° FOV horizontal) und DrivingSim (230° FOV horizontal). Die N = 18 Probanden hatten Nebenaufgaben zu erfüllen, während sie auf einer einstreifigen, ländlichen Straße in ständiger Folgefahrt fuhren. Die Bearbeitungszeit für diese Aufgaben wurde ebenso gemessen wie die Geschwindigkeit, die Zeitlücke und die laterale Position. Auch wurden die Probanden nach der Einschätzung ihrer Fahrleistung befragt.

Im Rahmen des HASTE-Projekts führten **Jamson & Mouta (2004)** Versuche durch. N = 24 Probanden führen in einem statischen low-cost Fahrsimulator (27° FOV horizontal), während weitere N = 24 Probanden in der Versuchsreihe am statischen Leeds- Fahrsimulator (230° FOV horizontal) teilnahmen. Die beiden Fahrsimulatoren unterschieden sich zudem hinsichtlich des dynamischen Feedback-Angebots. Die Probanden absolvierten eine 29 km lange Strecke mit Geschwindigkeitsbegrenzung und einem Fahrstreifen je Richtung und führten dabei Nebenaufgaben unterschiedlichen Schwierigkeitsniveaus aus. Teilweise war ein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden, welchem es zu folgen galt. Aufgezeichnet wurden Geschwindigkeit, time to collision, Reaktionszeit auf Events, Spurabweichung, Lenkradrückstellrate, time to line crossing.

2.3.7 Ergebnisse zu Validitätskennwerten

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse bisheriger Validierungsstudien, getrennt nach den einzelnen Kennwerten, gegeben (Tabelle 2.7). Die Darstellung erfolgt in alphabetischer Reihenfolge der Kennwerte. Dabei wird jeweils kurz angegeben, ob es sich um eine statische (stat.) oder dynamisch (dyn.) Ausführung des Fahrsimulators in der Studie handelt und wie groß der Sichtwinkel horizontal nach vorne ist.

Tabelle 2.7: Ergebnisse bisheriger Validierungsstudien zu einzelnen Kennwerten.

Den **Abstand** zwischen dem Egofahrzeug und einem vorausfahrenden Fahrzeug als Maß der Längsführung untersuchten u. a. Hirata et al. (2007, dyn, HMD mit 360°). Hier zeigte sich nur bei einer Abstandsvorgabe von 25 m ein signifikanter Unterschied zwischen Feld und Simulator; im Fahrsimulator lag der gewählte Abstand dabei unter dem im Feld. Ansonsten kamen Hirata et al. (2007) zu absoluter Validität hinsichtlich des Abstandsverhaltens, wenn auch im Fahrsimulator stets eine geringere Distanz aufgetreten ist. Als Erklärung hierfür sind die bei einer zweidimensionalen Sichtsimulation fehlenden Tiefenreize genannt. Zu einem gegensätzlichen Ergebnis kamen Panerai et al. (2001, dyn., 180°) in ihrer Studie; sie ermittelten einen fast doppelt so großen Abstand in einem LKW Fahrsimulator als im Feld, sofern erfahrene Probanden betrachtet wurden. Laien hingegen hielten sogar einen noch größeren Abstand ein. Auch Leclerc et al. (2008, dyn., 150°) bestätigten dies und zeigten, dass der Abstand zu einem Zielobjekt beim Bremsen im Fahrsimulator größer ist als im Feld. Duncan (1995, dyn., 210°) kam ebenfalls zu dem Ergebnis, dass der Sicherheitsabstand im Fahrsimulator größer gewählt wird als im Feld. Auch der minimal gewählte Abstand im Fahrsimulator erwies sich als größer.

Das **Blickverhalten** wurde ebenfalls untersucht. Abendroth et al. (2012, stat., 43°) verglichen in ihrer Untersuchung die relative kumulierte Blickdauer und Blickhäufigkeit auf ausgewählte AOI. Es zeigte sich nur für ausgewählte AOI absolute Validität. Bernasch, Bengler, Löwenau & Scholles (o.J., stat., 42°) fanden heraus, dass die Probanden die gleichen Objekte zur Orientierung in Kurven nutzten (z. B. Fahrstreifenbegrenzung) und eine sehr ähnliche Blickstrategie verwendeten. Der genutzte Blickwinkel betrug dabei in etwa $\pm 15^\circ$ in beiden Umgebungen. Carter & Laya (1998, stat., FOV ohne Angabe) fanden in ihrer Untersuchung hingegen heraus, dass die Anzahl an Fixationen pro Sekunde in simulierter Umgebung signifikant höher war als im Feld. Duncan (1995, dyn., 210°) zeigte, dass die Umgebung bzw. der „off road“-Bereich im Fahrsimulator insgesamt seltener angesehen wurde bei Ausführung einer Nebenaufgabe.

Die **Gaspedalposition** als weiterer Kennwert wurde von Reed & Green (1995, stat., 33°) untersucht; es zeigte sich keine absolute Validität. Die Varianz war dabei im Feld größer als in simulierter Umgebung. McLane & Wierwille (1975, dyn., 48°) betrachteten den Richtungswechsel der Gaspedalbetätigung und identifizierten diesbezüglich eine abnehmende Umkehrrate in Abhängigkeit verschiedener Gestaltungsparameter im Fahrsimulator. War kein Sound vorhanden, zeigte sich der größte Wert; dieser war signifikant unterschiedlich zu einer Fahrt in einem Simulator mit Sound und Bewegung. Die kleinste Umkehrrate lag hingegen bei fehlender Bewegung vor.

Die **Gierrate** als Kennwert fand bislang in Validierungsstudien nur wenig Beachtung. McLane & Wierwille (1975, dyn., 48°) identifizierten einen Einfluss verschiedener Gestaltungsparameter einer Fahrsimulation auf das Gieren. Die größte Kursabweichung zeigte sich bei fehlender Bewegungssimulation mit Sounddarstellung, gefolgt von fehlender Sounddarstellung im dynamischen Fahrsimulator und schließlich einem maximalen Aufbau mit Bewegung und Sound. Dabei gab es einen signifikanten Unterschied zwischen dem statischen und dynamischen Aufbau. Blaauw (1982, dyn., 120°) betrachtete die Standardabweichung der Gierrate und kam zu dem Ergebnis, dass diese für erfahrene Probanden im Fahrsimulator signifikant kleiner ausfällt als im Feld und für unerfahrene Fahrer kein Unterschied zwischen den Umgebungen besteht.

Auch der **Hautleitwert** wurde bisher nur in wenigen Studien berücksichtigt. Leclerc et al. (2008, dyn., 150°) identifizierten anhand dieser physiologischen Größe eine höhere Beanspruchung im Simulator bei Bremsungen. Hirata et al. (2007, dyn., HMD mit 360°) kamen hingegen zu dem Ergebnis, dass der Hautleitwert im dynamischen Fahrsimulator und im Feld annähernd gleiche Indizien für das Vigilanzniveau lieferte.

Engström et al. (2005, dyn., 120°) konnten einen höheren Hautleitwert und somit ein Indiz für einen höheren Workload der Probanden im Feldversuch, verglichen mit einer Fahrt im dynamischen Fahrsimulator, aufzeigen.

Die **Herzschlagrate** als weiterer Beanspruchungsindikator wurde von Reimer & Mehler (2011, stat., 40°) betrachtet. Sie fiel im Feldversuch höher aus als im Simulator. Johnson et al. (2011, stat., 135°) konnten einen signifikanten Unterschied der mittleren und maximalen Herzschlagrate nachweisen. Engström et al. (2005, dyn., 120°) kamen in ihrer Untersuchung zu der Erkenntnis eines höheren physiologischen Workloads in realer Umgebung als im dynamischen Simulator, gemessen unter anderem an der Herzschlagrate. Eine mögliche Ursache kann gemäß Engström et al. (2005) in dem höheren Gefährdungsrisiko gesehen werden, welches mit einer realen Verkehrssituation einhergeht.

Sehr oft betrachtet wurde in den bisherigen Validierungsstudien der Kennwert der **Längsgeschwindigkeit**.

Einige Studien weisen ein Indiz auf absolute Validität der mittleren Längsgeschwindigkeit auf. So konnten Ahlström et al. (2012, dyn., 120°), Engen (2008, dyn., 180°), Chialakapati (2006, dyn., FOV ohne Angaben), Alm (1995, stat./ dyn., 120°) sowie größtenteils auch Yan, Abdel-Aty, Radwan, Wang & Chialakapati (2008, dyn., 180°) keinen signifikanten Unterschied der mittleren Geschwindigkeit zwischen beiden Untersuchungsumgebungen feststellen. Zu dieser Erkenntnis kam auch Blana (1996a) in seinem Literaturüberblick. Zwar fuhren Probanden teilweise im Fahrsimulator etwas schneller als im Feld (u. a. Chialakapati, 2006; Chanton et al., 2002, dyn., 150°; Senserrick et al., 2007, dyn., FOV ohne Angabe), dieser Unterschied erwies sich jedoch größtenteils nicht als signifikant. Ein Indiz auf absolute Validität ließ sich zudem in Studien aufzeigen, die sehr spezifische Szenarien untersuchten. So fand Bella (2005, stat., FOV ohne Angaben) keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Geschwindigkeiten in Baustellen für beide Untersuchungsumgebungen. Dieses Ergebnis spiegelt sich zudem bei einer späteren Studie von Bella (2008, stat., 135°) wieder, bei der 9 von 11 Messungen in einem Geschwindigkeitsbereich bis ca. 100 km/h keinen signifikanten Unterschied zwischen Feld und Simulator aufwiesen. Gleiches galt bei anspruchsvollen Streckenabschnitten mit scharfen Kurven, für die sich ebenfalls absolute Validität zeigte. Auch Mathur et al. (2010, stat., 120°) konnten für komplexe Szenarien wie Baustellenbereiche absolute Validität zeigen. Bei der Studie von Hirata et al. (2007, dyn., HMD mit 360°) fehlte den Probanden eine Tachometerinformation und sie erhielten zudem die Aufgabe, eine vorgegebene Geschwindigkeit einzuhalten. Für die betrachteten 60 km/h- und 100 km/h-Zonen zeigten sich hier keine signifikanten Unterschiede, dennoch fuhren die Probanden im Fahrsimulator leicht schneller.

Neben diesen Studien finden sich auch Untersuchungsreihen mit konträrem Validitätsergebnis. Eine signifikant höhere Geschwindigkeit im Fahrsimulator zeigte sich bei Bella (2008, stat., 135°), sofern wenig anspruchsvolle Streckenabschnitte gefahren wurden. Duncan (1995, dyn., 210°) kam in seiner Studie ebenfalls zu dem Ergebnis einer erhöhten Geschwindigkeit im Fahrsimulator gegenüber der Realfahrt; es zeigte sich jedoch, dass die Wahrnehmung bzw. Einschätzung der Geschwindigkeit dabei nicht signifikant unterschiedlich war. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Shinar & Ronen (2007, stat., 40°) in ihrer Untersuchung für mittlere Geschwindigkeiten sowie Marberger (2008, dyn., 180°) für die Richtung der Geschwindigkeitsabschätzung auf Autobahnabschnitten. Dies stützt den Erklärungsansatz der bewussten Geschwindigkeitsüberhöhung aufgrund des fehlenden Gefahrenpotentials im Fahrsimulator (u. a. Östlund, Nilsson, Törnros & Forsman, 2006, dyn., FOV ohne Angaben). In den Studien von Brünger-Koch et al. (2006, dyn., FOV ohne Angaben) und Törnros (1998, dyn., 120°) sowie zumindest teilweise bei Brown (2012, dyn., 180°) zeigte sich ebenfalls eine entsprechende Signifikanz des Unterschieds der Geschwindigkeit zwischen beiden Untersuchungsumgebungen, wobei auch hier im Fahrsimulator schneller gefahren wurde. Dieser Unterschied betrug bei Brünger-Koch et al. (2006) durchschnittlich 3-5 km/h für gerade und kurvice Strecken. Auch Brown (2012) konnte zumindest für zwei von drei Segmenten eine signifikant höhere maximale Geschwindigkeit im Fahrsimulator zeigen. Carter & Laya

(1998, stat., FOV ohne Angaben) erzielten in ihren Versuchen eine signifikant höhere Maximalgeschwindigkeit und eine signifikant geringere Minimalgeschwindigkeit im Fahrsimulator gegenüber dem Feldversuch.

Ebenfalls keine Validität, jedoch eine teils signifikant geringere Geschwindigkeit im Fahrsimulator verglichen zur realen Umgebung wiesen Jamson (2000, stat., 120°) und Klee, Bauer, Radwan & Al-Deek (1999, stat., FOV ohne Angaben) nach. Eine geringere Geschwindigkeitsüberschreitung (Differenz zwischen zulässiger und gefahrener Geschwindigkeit) im Fahrsimulator verglichen mit dem Feld zeigte sich ebenfalls in einzelnen Studien (Abendroth et al., 2012, stat., 43°; Shechtman et al., 2009, stat., 180°).

Hinsichtlich der Standardabweichung der Geschwindigkeit finden sich ebenfalls einige Ergebnisse bisheriger Studien. Keinen signifikanten Unterschied und somit ein Indiz für Validität zeigten die Untersuchungsreihen von Brünger-Koch et al. (2006, dyn., FOV ohne Angaben), Reed & Green (1995, stat., 33°) sowie teilweise die Versuche von Yan et al. (2008, dyn., 180°). Bei 2 von 4 Kreuzungsannäherungen zeigten sich hier keine signifikanten Unterschiede, während bei den anderen beiden Fällen die Standardabweichung der Geschwindigkeit im Fahrsimulator signifikant höher lag. Eine (nicht signifikant) geringere Standardabweichung der Geschwindigkeit im Simulator gegenüber einer Feldfahrt wiesen die Studien von Senserrick et al. (2007, dyn., FOV ohne Angaben) und Engen (2008, dyn., 180°) auf. Keine Validität zeigten hingegen die Studien von Ahlström et al. (2012, dyn., 120°) und Alm (1995, stat./ dyn., 120°), bei denen eine signifikant höhere Standardabweichung im Simulator als im Feld gemessen wurde.

Die Ergebnisse bisheriger Validierungsstudien zeigten zudem den Einfluss einzelner Gestaltungsparameter eines Fahrsimulators auf die Geschwindigkeit. So fuhren Probanden in der Untersuchung von De Winter et al. (2008, stat., FOV ohne Angaben) mit Vibrationssitz in Rechtskurven signifikant langsamer als ohne vibrierende Eigenschaften. Jamson (2000, stat., 120°) wiesen einen Einfluss der Auflösung nach und zeigten diesbezüglich, dass eine niedrige Auflösung zu einer langsameren Geschwindigkeit führte. Bei dieser Untersuchung zeigte sich im Feld die höchste Geschwindigkeit, gefolgt von einer Simulatorfahrt mit hoher Auflösung und schließlich einer niedrigen Auflösung. In einer späteren Studie von Jamson (2001, stat., 230°) konnte jedoch kein Einfluss der Auflösung auf die Geschwindigkeit mehr festgestellt werden. Hier zeigte sich jedoch, dass sich der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Feld und Simulator bei einer Sichtwinkelerweiterung verringerte. McLane & Wierwille (1975, dyn., 48°) erhielten für eine dynamische Simulatorfahrt ohne Sounddarstellung die größte Standardabweichung der Geschwindigkeit. Für eine Fahrt ohne Bewegungssimulation, jedoch mit Soundsimulation ergab sich eine kleinere Standardabweichung und für einen dynamischen Fahrsimulator mit Sound die geringste Standardabweichung. Der Unterschied zwischen den Simulatorvarianten war jedoch nicht signifikant. Den Einfluss unterschiedlicher Fahrsimulatoren auf die mittlere Geschwindigkeit bestätigten auch Jamson & Mouta (2004, stat., 27°/ 230°); hier fuhren die Probanden bei Ausführung einer Nebenaufgabe im low-cost Fahrsimulator signifikant schneller als im medium-cost Fahrsimulator mit erweiterter Sicht und vorhandener dynamischer Feedbacklösung. Die Studie von Santos, Merat, Mouta, Brookshuis & De Waard (2005, stat., 27°/ 230°) zeigte ebenfalls einen signifikanten Unterschied für den Mittelwert sowie auch die Standardabweichung der Geschwindigkeit hinsichtlich verschiedener Simulatorenbauten, die sich bzgl. mehrerer Gestaltungsparameter voneinander unterschieden und daher keinen eindeutigen Rückschluss auf einzelne Gestaltungsparameterinflüsse zuließen. Hoffmann & Buld (2006, dyn., 180°) konnten zudem zeigen, dass das Training von Probanden in einem Fahrsimulator zu einer reduzierten Geschwindigkeitswahl führte.

Ein ebenfalls sehr häufig betrachteter Kennwert in Validierungsstudien ist die **laterale Position**. Engen (2008, dyn., 180°) konnte ähnliche Ergebnisse im Feld und im Simulator bzgl. des Mittelwerts der lateralen Position erzielen. Ein anderes Bild ergab sich bei Blaauw (1982, dyn., 120°), bei dessen Versuchen der Mittelwert der lateralen Position im Fahrsimulator signifikant höher ausfiel als im Realen; gemessen wurde der Abstand zur rechten Fahrstreifenmarkierung. Harms (1996, dyn., FOV ohne Angabe) sowie auch Tömros (1998, dyn., 120°)

hingegen zeigten in ihren Studien konträre Ergebnisse; hier war die laterale Position im Fahrsimulator signifikant kleiner als im Feld; die Probanden fuhren in simulierter Umgebung näher an der Fahrstreifenmarkierung. Dabei hängt die Aussagekraft immer von der Definition der Bezugslinie für laterale Abweichung ab. Östlund et al. (2006, dyn., FOV ohne Angaben) kamen zu der Erkenntnis, dass im Feld tendenziell weiter links gefahren wird auf der Autobahn. Shechtman et al. (2009, stat., 180°) sowie Engen (2008) zeigten eine höhere Variation der lateralen Position im Feld als im Fahrsimulator. Marberger (2008, dyn., 180°) hingegen konnte keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Standardabweichung der lateralen Position zwischen beiden Untersuchungsumgebungen und somit ein Indiz für absolute Validität nachweisen. Blaauw (1982, dyn., 120°) erzielte größere Schwankungen der lateralen Position in simulierter Umgebung, die sogar signifikant wurden.

Ebenfalls wie bei der Geschwindigkeit zeigte sich auch für die laterale Position ein Einfluss verschiedener Gestaltungsparameter eines Fahrsimulators auf die Validität. So war die Variation der lateralen Position im statischen Fahrsimulator größer als in einer dynamischen Ausführung (Engström et al., 2005, stat./ dyn., 135°/ 120°). Eine Reduktion der Auflösung bei gleichzeitiger Vergrößerung des FOV reduzierte die Übereinstimmung der lateralen Position zwischen realer und simulierter Umgebung (Jamson, 2000, stat., 120°). Der FOV spielte dabei eine noch größere Rolle auf die laterale Position als die Auflösung. McLane & Wierwille (1975, dyn., 48°) konnten eine Abnahme des lateralen Versatzes in folgender Reihenfolge aufzeigen: statische Fahrsimulatoreausführung mit Sound, dynamische Fahrsimulatoreausführung mit Sound, dynamischer Fahrsimulator ohne Soundsimulation. Dabei erwies sich der Unterschied zwischen den beiden letztgenannten Varianten als signifikant. Jamson & Jamson (2010, stat., 50°/ 230°) erzielten in ihrer Studie im LabSim Fahrsimulator eine signifikant größere Standardabweichung der lateralen Position als im DrivingSim. Der Mittelwert unterschied sich hingegen in beiden Simulatoren nicht.

Ein oft betrachteter Kennwert in Validierungsstudien sind der **Lenkradwinkel** oder ähnliche Maße der Querführung wie Lenkumkehrung oder das Lenkverhalten. Die Ergebnisse sind jedoch hinsichtlich ihrer Ausrichtung verschieden. So zeigten Chanton et al. (2002, dyn., 150°) einen größeren mittleren Lenkradwinkel im Simulator als im Feld, während Engström et al. (2005, stat./ dyn., 135°/ 120°) ein stärkeres Lenkverhalten im Feld aufdeckten. Erklärt wird dieses Ergebnis anhand des vermehrten Verkehrs im Realen und dem damit einhergehenden höheren Risiko für den Probanden. Die Standardabweichung des Lenkradwinkels erwies sich in der Studie von Reed & Green (1995, stat., 33°) als beachtlich größer im Fahrsimulator gegenüber einer Feldumgebung, während Blaauw (1982, dyn., 120°) ein gegensätzliches Ergebnis erzielte und die erfahrenen Probanden eine signifikant kleinere Standardabweichung im Simulator aufwiesen. Bei unerfahrenen Probanden ergab sich kein Unterschied zwischen beiden Untersuchungsumgebungen.

Ein Einfluss einzelner Gestaltungsparameter der Fahrsimulation auf den Lenkradwinkel konnte ebenfalls gezeigt werden. Knappe (2009, stat., 135°) wies einen Einfluss des Sichtwinkels auf die Standardabweichung des Lenkradwinkels nach; bei 5° fiel diese signifikant höher aus als bei 135°. McLane & Wierwille (1975, dyn., 48°) identifizierten die größte Lenkumkehrrate in einem Fahrsimulator mit fehlender Bewegungssimulation; diese unterschied sich signifikant von der Umkehrrate im dynamischen Fahrsimulator. Der Vergleich zwischen einem dynamischen Fahrsimulator mit und ohne Sound wies hingegen keine Signifikanz auf.

Die **subjektive Empfindung** der an den Validierungsstudien beteiligten Probanden lieferte neben den objektiven Kennwerten ebenfalls wichtige Erkenntnisse zum Realitätsgrad einer Fahrsimulation. In der Untersuchungsreihe von Duncan (1995, dyn., 210°) beurteilten die Probanden die Lenkung im Fahrsimulator als schwieriger verglichen mit der Realfahrt. Die Studie von Marberger (2008, dyn., 180°) kam ebenfalls zu dem Ergebnis einer häufig als schlechter eingestuften Realitätsempfindung im Simulator, während Wade & Hammond (1998, stat., FOV ohne Angabe) eine mittelmäßige Beurteilung des Komfortlevels sowie des Realitätsgrads erzielten. Dabei wurde eine dynamische Fahrsimulatorkonfiguration einer statische Ausführung vorgezo-

gen (Colombet et al., 2008, dyn., FOV ohne Angaben; De Winter et al., 2008, stat., FOV ohne Angaben). Die Probanden in der Studie von Blaauw (1982, dyn., 120°) stufen die Fahrt im Fahrsimulator als schwieriger und monotoner ein. Das wahrgenommene Risiko in simulierter und realer Umgebung erwies sich als vergleichbar in der von Watts & Quimby (1979, stat., 60°) durchgeführten Validierungsstudie.

Ein Zeitmaß für die Distanz zwischen Fahrzeugen ist die **TTC** (time to collision). Kapstein, Van der Horst & Hoekstra (1996, stat., 40°) belegten absolute Validität für die minimale TTC im statischen Fahrsimulator, wenn die Probanden die Anweisung erhielten, hart zu bremsen. Bei normalem Bremsvorgang lag die minimale TTC im Feld unter der in simulierter Umgebung.

Die **Zeitlücke** als weiteres Zeitmaß der Distanz zwischen zwei Fahrzeugen erwies sich im Fahrsimulator als signifikant höher als im Feld; es ergaben sich fast doppelt so große Zeitlücken (Abendroth, Schreiber, Bruder, Maul & Maul, 2011, stat., 43°). Engen (2008, dyn., 180°) kam hinsichtlich der Standardabweichung dieses Kennwerts ferner zu dem Ergebnis, dass diese im Fahrsimulator viel kleiner ausfiel als im Feld. Jamson & Jamson (2010, stat., 50°/ 230°) identifizierten einen Unterschied bzgl. der gewählten Zeitlücke zwischen zwei Fahrsimulatoren. Eine genaue Zuordnung des Einflusses auf einen Gestaltungsparameter ist nicht möglich, da sich die Simulatoren in mehreren Aspekten unterschieden.

Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse bisheriger Validierungsstudien zeigen bereits deutliche Differenzen für einzelne Kennwerte. Es finden sich immer wieder Unstimmigkeiten bzw. Gegensätze, die keine konkrete Schlussfolgerung bzgl. der Validität eines Kennwerts zulassen. Eine mögliche Erklärung kann in dem methodischen Vorgehen liegen, das bei diesen Studien Anwendung fand. Zudem gibt es inhaltliche Aspekte, die hinterfragt werden können. Beispielsweise werden wesentliche Einflussfaktoren auf die Validität unberücksichtigt gelassen.

2.3.8 Kritische Betrachtung bisheriger Forschung

Im folgenden Abschnitt wird zunächst einmal auf methodische Aspekte, die den Aussagegehalt bisheriger Untersuchungen im Bereich der Fahrerverhaltensvalidität beschränken, eingegangen, bevor inhaltlich Kritik geübt wird. Hieraus leiten sich Forschungslücken ab, die im Rahmen dieser Arbeit geschlossen werden.

Methodisch

Mehrere der hier vorgestellten Studien sind hinsichtlich ihrer Aussagekraft für die Validitätsanalytik als fragwürdig anzusehen. Dies hat mehrere methodische Gründe.

Zunächst werden die **Zusammensetzung und der Umfang des Probandenkollektivs** bisheriger Validierungsstudien kritisch betrachtet. Ein Vergleich von Fahrerverhaltenskennwerten aus realer und simulierter Umgebung macht nur Sinn, sofern beiden Untersuchungen möglichst identische Bedingungen zugrunde liegen. Neben einem vergleichbaren Szenario kann

hierzu auch ein identisches Probandenkollektiv gezählt werden. Bereits Rohmert (1984) zeigt in seinem Beanspruchungs-Belastungs-Konzept den Einfluss individueller Leistungsvoraussetzungen auf. Bisherige Validierungsstudien wie Chrysler et al. (2013), Abendroth et al. (2012) oder Bella (2008) greifen jedoch auf unterschiedliche Probanden in beiden Versuchen zurück, sodass sich die Beeinflussung durch einen individuellen Leistungsfaktor nicht ausschließen lässt. Dieser Probandeneinfluss wird zwar mit zunehmender Kollektivgröße kleiner, die Probandenzahl ist jedoch in vielen Validierungsstudien als zu gering einzustufen. Eine Stichprobengröße von mindestens 30 Probanden ist, nicht zuletzt vor dem Hintergrund einer aussagekräftigen statistischen Auswertung, zu empfehlen.

Bezüglich der **Untersuchungsszenarien** in realer und simulierter Untersuchungsumgebung ist anzumerken, dass oftmals keine spezifische Beschreibung dahingehend erfolgt, wie ähnlich die Szenarien im Simulator denen im Feld nachempfunden wurden.

Ebenfalls zu kritisieren ist die Tatsache, dass des öfteren Forschungseinrichtungen ihren eigenen Fahrsimulator validieren, was in erster Betrachtung naheliegend erscheint. Dies kann allerdings zu einer Beeinflussung der Ergebnisse führen, da der Untersucher nicht **unabhängig** und vielmehr selbst am positiven Ergebnis seiner Studie interessiert ist.

Ein großes Problem zur Interpretation der Ergebnisse bisheriger Studien sind die häufig **fehlenden statistischen Angaben**. So zeigte bereits der Versuch einer Metaanalyse von Zöller et al. (2013), wie viele Validierungsstudien aufgrund fehlender statistischer Größen aus einer Vergleichsbetrachtung ausscheiden mussten.

Inhaltlich

Neben den angemerkten methodischen Schwachstellen bisheriger Validierungsstudien sind auch inhaltliche Punkte zu nennen, die im Folgenden aufgezeigt werden.

Ein Aspekt ist die **Begrenztheit bisheriger Kennwertbetrachtungen**. Viele Validierungsstudien untersuchen Maße der Längs- und Querverführung. Es mangelt jedoch an einer weiter reichenden Betrachtung, wie sie bereits in der Validierungsmethodik von Brown (1975) zu finden ist. Er spricht, neben der Betrachtung von Fahrperformedaten, von einer vergleichenden Analyse des Fahrerverhaltens (z. B. Blickbewegungsanalyse), der physiologischen Beanspruchung sowie der subjektiven Empfindungen. Diese Bereiche finden jedoch bislang nur wenig Beachtung.

Bei mehreren Studien wurden zudem **unterschiedliche Fahrsimulatoren** verglichen. Diese Studien liefern bereits erste wichtige Erkenntnisse zur Validität verschiedener Fahrsimulatoren. Interessant wäre jedoch zudem eine sukzessive Untersuchung des Einflusses einzelner Gestaltungsparameter einer Fahrsimulation auf die Fahrerverhaltensvalidität. So können Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welcher Parameter wie stark und in welche Richtung Einfluss auf einzelne Kennwerte nimmt.

Ebenfalls auffällig ist, dass teilweise **kein Vergleich mit realen Fahrversuchen** stattfand, weshalb nur Aussagen über Tendenzen zwischen den einzelnen Varianten möglich sind, welche nicht unbedingt realitätsnah sein müssen.

Ein weiterer kritisch anzumerkender Punkt bezieht sich auf diese **Szenarienwahl**, die ihrerseits Einfluss auf die Fahrerhaltensvalidität hat. So untersuchten bisherige Studien die Validität eines Fahrsimulators oftmals anhand eines spezifischen Szenarios (u. a. Hirata et al., 2007; McAvoy, Schattier & Datta, 2007). Eine derart fokussierte Untersuchung genügt jedoch nicht, um auf die Gesamtvalidität schließen zu können (Godley et al., 2002).

Forschungslücken

Die vorangegangenen Ausführungen zum Stand der Forschung sowie insbesondere die finale kritische Betrachtung bisheriger Validierungsstudien zeigen, dass sich diese teilweise stark hinsichtlich der erzielten Validitätsergebnisse einzelner Kennwerte widersprechen. Es lassen sich keine allgemeinen Schlüsse und Gestaltungsempfehlungen für eine valide Fahrsimulation ableiten.

Zwei mögliche Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse wurden bereits aufgezeigt: methodische Aspekte und inhaltliche Differenzen zwischen verschiedenen Studien. In den einzelnen Studien kommen neben unterschiedlichen Kennwerten und Szenarien auch völlig verschiedene Fahrsimulatoraufbauten zum Einsatz. So unterscheiden sich die betrachteten Fahrsimulatoren insbesondere hinsichtlich der Fähigkeit, Beschleunigungskräfte zu simulieren, und hinsichtlich der Größe der dargebotenen Sichtsimulation. Soundsimulation sowie eine Krafrückkopplung über Force-Feedback Lösungen sind hingegen größtenteils vorhanden. Es stellt sich somit die Frage, ob und in welchem Ausmaß einzelne Gestaltungsparameter und das Untersuchungsszenario für die divergierenden Validitätsaussagen verantwortlich sind und welche Validitätskennwerte wie stark beeinflusst werden.

An diesen bislang kaum betrachteten Aspekten der Fahrerhaltensvalidität setzt diese Arbeit an, indem sie folgenden Fragen zu beantworten sucht:

- 1) *Sind Einflüsse ausgewählter Gestaltungsparameter auf die Fahrerhaltensvalidität zu verzeichnen?*
- 2) *Ist ein Einfluss des jeweiligen Untersuchungsszenarios auf die Fahrerhaltensvalidität zu verzeichnen?*

Aus den Erkenntnissen zur Richtung und Größe des Einflusses der betrachteten Gestaltungsparameter in Abhängigkeit des Szenarios lassen sich wichtige Schlüsse bzgl. des für Validität notwendigen bzw. hinreichenden Fahrsimulatoraufbaus ziehen.

Zur Klärung der formulierten Forschungsfragen wird im Folgenden zunächst die Wahrnehmungsphysiologie des Menschen näher beleuchtet, bevor die Wirkungskette von Szenario und Gestaltungsparameter auf die Fahrerhaltensvalidität mit Hilfe einer modellbasierten Be-

trachtung zunächst theoretisch hergeleitet wird. Evaluiert wird dieses Modell schließlich durch eine breit angelegte empirische Validierungsstudie. Neben einer umfangreichen Kennwertbetrachtung wird eine saubere Validierungsmethodik angewandt, um die aufgezeigten methodischen Kritikpunkte an bisherigen Studien zu umgehen.

2.4 Szenario und Gestaltungsparameter als Einflussfaktoren auf die Fahrerhaltensvalidität

Die identifizierten Forschungslücken beinhalten den Einfluss des Untersuchungsszenarios und der Gestaltungsparameter einer Fahrsimulation auf die Fahrerhaltensvalidität, der noch nicht detailliert genug erforscht wurde. Eine wichtige Frage, die sich zu Beginn der Betrachtung ergibt, ist die der möglichen Einflussnahme eines Forschers auf diese beiden unabhängigen Variablen. Während ein Untersuchungsszenario meist durch das jeweils verfolgte Ziel einer Fahrsimulatorstudie determiniert ist und entsprechend nicht weiter variiert werden kann, ergibt sich im Bereich der Fahrsimulatorkonfiguration ein weitreichenderer Gestaltungsspielraum. Meist ist es dem Forscher überlassen, den Fahrsimulator hinsichtlich verschiedener Gestaltungsparameter zumindest in gewissen Grenzen zu konfigurieren oder gar, im Falle einer größeren Forschungseinrichtung, zwischen verschiedenen komplexen Fahrsimulatoren zu wählen. Für die Zusammenstellung des Fahrsimulators und seiner Komponenten ist es wichtig, die für die Fahrzeugführung sowie für die jeweilige Fahraufgabe relevanten Informationen zu kennen. So kann in einem zweiten Schritt auf die notwendigen Gestaltungsparameter einer Fahrsimulation geschlossen werden, die für diese Informationsdarbietung verantwortlich sind. Im Folgenden wird daher zunächst auf die Informationswahrnehmung bei der Fahrzeugführung im Allgemeinen eingegangen, bevor die wichtige visuelle und vestibuläre Wahrnehmung des Menschen näher behandelt wird. Hierbei wird jeweils kurz auf Besonderheiten von Fahrsimulatoren bei der Informationsdarbietung Bezug genommen, die sich von Begebenheiten in realer Umgebung unterscheiden.

2.4.1 Menschliche Informationswahrnehmung

Die Reizwahrnehmung des Menschen erfolgt über Sinnesorgane. Tabelle 2.8 zeigt eine Aufstellung der menschlichen Sinnesorgane und der jeweiligen sensorischen Modalitäten sowie Empfindungen in Anlehnung an Schönplflug & Schönplflug (1997). Zudem erfolgt unter Rückgriff auf Biedermann (1984) und Kayser, Sanders, Heß, Spijkers & Bartmann (1989) eine Einstufung, wie hoch die Bedeutung der Reize für die Fahrzeugführung ist.

Tabelle 2.8: Sensorische Modalitäten der menschlichen Informationsaufnahme (in Anlehnung an Schönplflug & Schönplflug, 1997; Biedermann, 1984; Kayser et al., 1989).

Modalität		Sinnesorgan	Empfindung	Bedeutung für die Fahrzeugführung
Visuell		Auge	Farbe, Helligkeit	Hoch
Auditiv		Innenohr	Tonhöhe, Lautstärke	Mittel
Vestibulär		Vestibularapparat	Lineare und Winkelbeschleunigung	Mittel
Haptisch	Taktil	Haut	Druck, Vibration	Mittel
	Kinästhetisch	Muskelspindel, Gelenke, Bänder	Stellung der Körperteile zueinander, Körperbewegungen	Mittel
	Thermisch	Haut	Warm-Kalt	Gering
	Schmerzen	Unspezifisch	Schmerz	Gering
Olfaktorisch		Schleimhaut im oberen Nasenraum	Geruch	Gering
Gustatorisch		Zungenoberfläche	Geschmack	Gering

Für die Führung eines Fahrzeugs sind überwiegend 4 sensorische Modalitäten von zentraler Bedeutung: visuell, vestibulär, haptisch und akustisch. Kayser et al. (1989) beschreibt die dabei besonders herausstechende Bedeutung der visuellen Informationswahrnehmung für die Fahrzeugführung wie folgt:

„Das sichere Führen eines Fahrzeugs fordert vom Fahrzeuglenker die internale Verarbeitung komplexer Straßenraumsituationen, die aufgrund der vorhandenen Fahrgeschwindigkeit nur durch das antizipationsfähige visuelle Sinnesorgan rechtzeitig wahrgenommen werden können“ (S. 1).

Während der Mensch über den Tag betrachtet mehr als 80% seiner Informationen über den visuellen Sinneskanal aufnimmt (Herget, 1982), liegt die Bedeutung der visuellen Informationsaufnahme bei der Fahrzeugführung mit mehr als 90% noch höher (Hartmann, 1970). Die restlichen 10% der Informationen verteilen sich absteigend auf die vestibuläre, haptische und akustische Wahrnehmung (Weber, 1972, zitiert nach Böhlke, 1984).

Welche Informationen überwiegend über die einzelnen Wahrnehmungskanäle bei der Fahrzeugführung aufgenommen werden, zeigt Tabelle 2.9. Dabei liegt der Fokus auf Informationen, die sich der Stabilisierungsebene der primären Fahraufgabe zuordnen lassen. Die Zuordnung der Wahrnehmungskanäle sowie die Informationen für die Fahrzeugführung erheben dabei nicht den Anspruch der Vollständigkeit.

Tabelle 2.9: Zuordnung fahrzeugführungsrelevanter Informationen zu den Sinneskanälen (in Anlehnung an Tomaske & Meywerk, 2006; Wolf, 2009; Tomaske, 1983).

	Visuell	Vestibulär	Haptisch ⁴	Akustisch
Längs-/Quergeschwindigkeit	x			
Längs-/Querbeschleunigung		x	x	
Abstand zum Vorausfahrenden	x			
Fahrtgeräusch				x
Gas-/Bremspedalposition			x	
Laterale Position (Spurabweichung)	x			
Wank-/Nickwinkel	x	x		
Gierwinkel	x			
Kräfte in Stellgliedern (Lenkmoment)			x	
Lenkradwinkel	x		x	
Giergeschwindigkeit	x			
Gierbeschleunigung		x		

Die folgenden Ausführungen basieren, sofern nicht anders kenntlich gemacht, auf Tomaske & Meywerk (2006).

Die Spurabweichung wird ebenso visuell wahrgenommen wie die Quer-, Gier- sowie die Längsgeschwindigkeit und der Abstand zum Vorausfahrenden. Diese Informationswahrnehmungen basieren auf dem Prinzip des optischen Flusses (Andersen, 2011; Beusmans, 1998; Lee, 1980; Gibson, 1950).

Gibson & Crooks (1938) definieren optischen Fluss als die visuelle Bewegung, die aufgrund einer Eigenbewegung des Menschen, fahren oder gehen, erlebt wird (zitiert nach Kemeny & Panerai, 2003). Ein anschauliches Beispiel zum besseren Verständnis des Prinzips des optischen Flusses findet sich in Chatziastros (2003): „[...] ist optischer Fluss vereinfachend gesagt, was man auf einer Fotografie sieht, wenn man die Kamera vor das Auge hält, die Blende öffnet, einen Schritt nach vorne macht und die Blende wieder schließt“ (S. 4). Das Prinzip des optischen Flusses ist dabei eng verbunden mit dem Prinzip der Bewegungsparallaxe, bezieht sich jedoch auf die Gesamtheit optischer Veränderungen und umfasst somit ein weiteres Feld als lediglich den Versatz zwischen zwei Punkten in der Umgebung (Nakayama & Loomis, 1974).

Die Information zur Fahrzeuglängsgeschwindigkeit kann neben der visuellen Wahrnehmung über den optischen Fluss weiterhin unterstützt werden durch die Aufnahme von Fahrtgeräuschen über den akustischen Kanal. So kann der Fahrer aus Motoren-, Wind- und Abrollgeräuschen Informationen zu seiner Fahrgeschwindigkeit ziehen (Knappe, 2009; Tomaske, 1983). Quer- und Längsbeschleunigungen werden überwiegend vestibulär wahrgenommen. Hierüber erfährt der Proband beispielsweise wichtige Rückmeldungen beim Durchfahren von Kurven

⁴ Die haptische Wahrnehmung umfasst für die weitere Betrachtung lediglich die kinästhetische Wahrnehmung von Position und Bewegung der Muskeln und Gelenke sowie die taktile Wahrnehmung über die Haut (Kemeny & Panerai, 2003), da thermische Reize ebenso wie Schmerzen bei der Fahrzeugführung von geringer Relevanz sind.

(Knappe, 2009). Jedoch kann der Fahrer auch haptische Informationen, wie das Lenkradrückstellmoment, zur Einschätzung der Querbeschleunigung nutzen (Tomaske, 1983). Die Gierwinkelbeschleunigung wird ausschließlich vestibulär wahrgenommen. Der Gierwinkel hingegen entspricht, sofern keine Störgrößen einwirken, einer Reaktion auf eine Lenkradwinkeländerung (Tomaske, 1983) und wird über das zentrale Gesichtsfeld visuell wahrgenommen. Wank- und Nickwinkel werden sowohl visuell als auch über die Änderung der Körperposition im Raum und somit vestibulär erfasst. Der Lenkradwinkel wird visuell (Tomaske & Meywerk, 2006) und haptisch über die Armstellung wahrgenommen (Wolf, 2009). Kräfte in den Stellgliedern, wie die Pedalkräfte und das Lenkmoment, werden taktil über Druck und Verformung der Haut sowie kinästhetisch durch Stellungsänderung der Sehnen, Muskeln und Gelenke bemerkt. Auch die Gas- und Bremspedalposition werden haptisch erfasst.

Stellt ein Simulator nicht alle nötigen Reize, wie bspw. Bewegungsimpulse, bereit, kann der Fahrer die vorgestellten Informationen nicht empfangen und seine Fahrleistung kann negativ beeinflusst werden (Repa, Leucht & Wierwille, 1981). Gemäß Kemeny & Panerai (2003) können folgende Systemkomponenten eines Fahrsimulators genannt werden, die bei einer Fahrt in simulierter Umgebung eine tragende Rolle für die Informationsdarbietung und somit die Fahrleistung des Probanden spielen: das visuelle System zur Ansprache der visuellen Wahrnehmung, das Bewegungssystem zur Ansprache der vestibulären Wahrnehmung, das kinästhetische Feedback, sog. Force-Feedback Lösungen an Pedalerie und Lenkrad, zur Ansprache der haptischen Wahrnehmung sowie letztlich das Soundsystem zur Ansprache der akustischen Wahrnehmung. Krafrückkoppelnde Force-Feedback-Lösungen sowie auch einfache Soundsysteme sind bereits in low-level Fahrsimulatoren weit verbreitet und eine relativ günstige Komponente einer Fahrsimulation (Jamson, 2011). Wesentlich weiter spannt sich die Variantenvielfalt und Kostendivergenz bei möglichen visuellen Systemen und Bewegungssystemen. Dennoch sind insbesondere diese beiden Gestaltungskomponenten eines Fahrsimulators von enormer Bedeutung (vgl. Padmos & Milders 1992; Kapstein et al., 1996; Reymond, Berthoz, Droulez & Kemeny, 2001), da über sie visuelle und vestibuläre Informationen vermittelt werden, die eine mittlere bis hohe Bedeutung für die Fahrzeugführung haben.

Im Folgenden wird daher vertiefend auf die visuelle und vestibuläre Informationswahrnehmung des Menschen eingegangen, um die Grundlagen für weitere Überlegungen im Hinblick auf den Einfluss dieser visuellen und vestibulären Gestaltungsparameter auf die Fahrerverhaltensvalidität zu liefern.

2.4.2 Grundlagen visueller Informationswahrnehmung

Physiologische Grundlagen

Die visuelle Wahrnehmung stellt ein Zusammenwirken von sensorischen und motorischen Leistungen des Auges als visueller Sinneskanal des Menschen und des Zentralnervensystems

dar (Eysel, 2007). Bei der visuellen Informationswahrnehmung durchdringt ein Lichtreiz die Hornhaut (Cornea) und die Pupille des Auges, wird an der Linse gebrochen und auf die Netzhaut (Retina) projiziert (Schlick et al., 2010). Photorezeptoren wandeln Licht in elektrische Nervenimpulse um und leiten diese an die Ganglienzellen weiter, deren Axone den Sehnerv des Menschen bilden. Der Sehnerv leitet die Informationen schließlich an das Gehirn (Birbaumer & Schmidt, 2006).

Hinsichtlich des Ortes der Objektabbildung auf der Retina kann grundlegend zwischen **fovealem** und **peripherem Sehen** unterschieden werden (Schweigert, 2003; Cohen, 1984; Abbildung 2.5). Foveales Sehen spielt sich im zentralen Sehbereich von 2° um die Fovea Centralis, die im Zentrum des gelben Flecks liegt, ab (Schweigert, 2003). Außerhalb eines Kegelöffnungswinkels von ca. 10° findet hingegen peripheres Sehen statt (Schweigert, 2003). Im Übergangsbereich zwischen 2° und ca. 10° spricht man auch von parafovealem Sehen (Schweigert, 2003). Im Bereich fovealen Sehens weisen Zapfen als Photorezeptoren die höchste Konzentration auf; hier sieht der Mensch scharf und nimmt Informationen wahr (Schweigert, 2003). Während diese Fähigkeit des Scharfsehens mit zunehmendem Abstand zur Fovea abnimmt, führt die hohe Anzahl sich außerhalb befindlicher Stäbchen als zweite Photorezeptoren-Art zu einer hohen Kontrastempfindlichkeit und so zur Wahrnehmung von Bewegung und Helligkeitsänderungen sowie zu einer Orientierung im Raum (Schweigert, 2003). Zudem ist in diesem Bereich die Abschätzung von Größe und Bewegungsrichtung von Objekten möglich (Kornhuber, 1978).

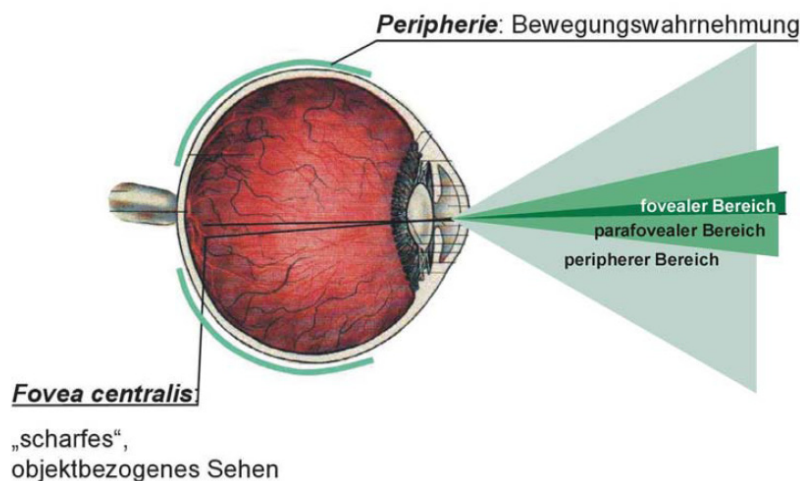


Abbildung 2.5: Querschnitt durch das Auge mit unterschiedlichen Sehbereichen (Schweigert, 2003).

Das Auge besitzt zur Informationsaufnahme verschiedene Fähigkeiten der Anpassung. Die **Adaption** (engl. adaption) beschreibt die Fähigkeit des Auges, sich bzgl. verschiedener Leuchtdichteniveaus zu regulieren (DIN 15007-1, 2000). Die **Akkommodation** (engl. accomodation) umschreibt die Anpassungsfähigkeit der Linse (DIN 15007-1, 2000); mittels einer Formänderung kann die Sehschärfe beim Betrachten naher und ferner Objekte reguliert werden (Eysel, 2007). Die dritte Anpassungsfähigkeit, die **Augenbewegung**, lässt sich ihrer-

seits einteilen in Fixationen, Sakkaden und Folgebewegungen (Schlick et al., 2010; Eysel, 2007). Dabei wird das Ziel, auf das das Auge ausgerichtet wird, als die **Blickrichtung** (engl. gaze of direction) bezeichnet (DIN 15007-1, 2000).

Bei der **Fixation** werden Informationen eines Objekts durch eine gezielte Betrachtung dessen aufgenommen; dabei fällt das fixierte Bild auf die Fovea (DIN 15007-1, 2000). Bei der Fahrzeugführung liegen Fixationsdauern in der Regel in einem Bereich ab 80-100 ms bis hin zu mehreren Sekunden (Schweigert, 2003). Um dem sich bewegenden Objekt zu folgen, verschiebt sich der fixierte Bereich langsam. In diesem Zusammenhang spricht man von **Folgebewegungen** des Auges (Eysel, 2007; Grüsser & Grüsser-Cornehls, 1987). Der im Gegensatz dazu schnelle, sprunghafte Wechsel zwischen zwei Fixationsobjekten wird als **Sakkade** bezeichnet (DIN 15007-1, 2000) und dauert in der Regel 15-100 ms (Birbaumer & Schmidt, 2006). Als Blickverhalten wird schließlich die Verkettung von Fixationen und Sakkaden bezeichnet (Cohen, 1998).

Die **Tiefenwahrnehmung** bezeichnet die Fähigkeit der Augen, Entfernungen von Objekten abzuschätzen (Knappe, 2009) und kann monokular und binokular erfolgen (Grüsser & Grüsser-Cornehls, 1987; Kemeny & Panerai, 2003). Die „monokulare Sicht“ bezieht sich hierbei auf das von einem Auge einsehbare Sichtfeld. Die Schnittmenge der einsehbaren Bereiche von beiden Augen wird unter dem Begriff „binokulare Sicht“ zusammengefasst (Woyna, 2014). Tiefeninformationen helfen auch bei der Wahrnehmung von Geschwindigkeiten (Larish & Flach, 1990). Die Grundlagen der im Nachfolgenden näher beschriebenen Kriterien zur Wahrnehmung räumlicher Tiefe sind Goldstein (2008) entnommen. Demnach gibt es folgende drei Kriterien, die räumliche Tiefe signalisieren, von denen die ersten beiden weitestgehend monokular wahrgenommen werden:

- Okulomotorische Tiefenreize
- Monokulare Tiefenreize
- Binokulare Informationen über räumliche Tiefe (bewegungsinduzierte Tiefenreize und stereoskopisches Sehen).

Okulomotorische Reize beruhen auf der Fähigkeit der Augen zur Konvergenz und Akkomodation. Während Akkomodation die bereits angesprochene Formveränderung der Linse beim Fixieren beschreibt, umfasst der Begriff der Konvergenz die Fähigkeit des Auges, sich einzudrehen, um nahe Objekte wahrzunehmen. Tiefenreize werden in diesem Zusammenhang also aus der Stellung der Augen und der Spannung der Augenmuskeln extrahiert.

Monokulare Tiefenreize lassen sich einem unbewegten Bild mit einem Auge (monokular) entnehmen und beruhen auf der Akkomodation sowie bildbezogenen und bewegungsinduzierten Tiefenreizen. Folgende bildbezogene Tiefenreize lassen sich aufgliedern: Verdeckung von Objekten (relative räumliche Tiefenwahrnehmung), relative Größe und Höhe im Gesichtsfeld, perspektivische Konvergenz (entferntere Objekte erscheinen unschärfer), vertraute Größe von Gegenständen, atmosphärische Perspektive, Texturgradient und Schatten.

Bewegungsinduzierte Tiefenreize wirken bei einer Eigenbewegung des Betrachters und lassen sich ebenfalls aufgliedern in die Bewegungsparallaxe (weiter entfernte Objekte bewegen sich langsamer, nähere Objekte schneller) und ein fortschreitendes Zu- oder Aufdecken von Flächen.

Stereoskopisches Sehen erfolgt über die sog. Querdissipation, ein Tiefenreiz, der durch die auseinanderliegenden Positionen beider Augen und dem damit einhergehenden unterschiedlichen Blickwinkel entsteht. Bei einem in der Ferne liegenden Objekt kommt es zu einer Parallelstellung der Sichtachsen und bei einem nah gelegenen Gegenstand zu einer Konvergenzbewegung. Diese Ausgleichsbewegung liefert eine Tiefeninformation.

Die einzelnen Tiefeninformationen kommen jeweils nur in bestimmten Entfernungsbereichen zum Tragen, wobei sich die in der Literatur auffindbaren Bereichsgrenzen stark unterscheiden. Goldstein (2008) beruft sich bei den Angaben auf Cutting & Vishton (1995). Okulomotorische Tiefeninformationen sind demnach nur im Nahbereich von 0-2 m verfügbar, während bewegungsinduzierte Informationen auch im mittleren Sichtbereich (2-30 m) eine Rolle spielen. Bildbezogene Tiefenreize, wie die Verdeckung und relative Größe des Gesichtsfelds, sind in ihrer Verfügbarkeit nicht begrenzt, während die relative Höhe im Gesichtsfeld erst ab einer mittleren (2 m) und die atmosphärische Perspektive ab einer großen Entfernung (über 30 m) herangezogen werden. Die Meinungen hinsichtlich der Entfernung, bei der Stereoskopie eine Rolle spielt, divergieren zwischen maximal 10 m (Cutting & Vishton, 1995) und teilweise bis zu 100 m (Loomis & Knapp, 1999).

Informationsdarbietung im Fahrsimulator

Nachdem die physiologischen Grundlagen der visuellen Wahrnehmung knapp erläutert wurden, wird darauf eingegangen, welche Aspekte für die Wahrnehmung einzelner fahrrelevanter Informationen verantwortlich sind und inwieweit diese Informationsdarbietung im Fahrsimulator erfolgt.

Dem zentralen (fovealen) Sehen kommt zweifelsfrei die größere Bedeutung bei der Fahrzeugführung zu (Cohen, 1984). Zur Rolle des peripheren Sehens bei der Fahrzeugführung liegen gemäß Cohen (1984) nur vereinzelte empirische Studien vor. Dennoch kommt dem peripheren Sichtbereich ebenfalls eine wesentliche Rolle bei der Fahrzeugführung zu. Dabei liegt das Prinzip des optischen Flusses zugrunde, der peripher wahrgenommen wird (Andersen, 2011).

Den optischen Fluss kann die Sichtsimulation eines Fahrsimulators nachbilden und dem Fahrer diese Informationen so zugänglich machen (Grüsser & Grüsser-Cornehls, 1987; Kemeny & Panerai, 2003). Nur ein ausreichend großes Sichtfeld ermöglicht eine korrekte Darstellung des optischen Flusses. Jamson (2001) nennt für Fahrsimulatorversuche ein Sichtfeld von 120° horizontal als ausreichend zur Geschwindigkeitswahrnehmung und somit zur Vermittlung des optischen Flusses. Das Sichtfeld wird meist über die Angabe des Sichtwinkels als Winkel

zwischen einer Referenzebene und einer Sichtlinie beschrieben (Woyna, 2014). In dieser Arbeit werden beide Begrifflichkeiten synonym verwendet.

Binokulare Reize, die ihrerseits über die Disparität Abstandsinformationen beinhalten, werden in vielen Simulatoren aufgrund der 2D-Darstellung nicht nachgebildet (Kemeny & Panerai, 2003; Knappe, 2009). Inwieweit diese fehlende Information eine Rolle bei der Fahrzeugführung spielt, hängt wiederum mit der Entfernung zusammen, in der sie zum Tragen kommt. Hier unterscheiden sich die Ansichten der Wissenschaftler, wie bereits gezeigt. Knappe (2009) geht davon aus, dass dies den schwerwiegendsten Unterschied zwischen realer und simulierter Umgebung ausmacht. Die alternative Entfernungseinschätzung mit Hilfe der Bewegungsparallaxe ist in Fahrsimulatoren oft aufgrund fehlender Nachbildungen in der Sichtsimitation ebenfalls nicht möglich (Kemeny & Panerai, 2003; Knappe, 2009). Bzgl. der Möglichkeit der Abstandseinschätzung auf Basis der Augenkonvergenz bzw. Akkomodation ist zu sagen, dass in einem Fahrsimulator eine Diskrepanz besteht zwischen der Information, die dem Gehirn zur Verfügung gestellt wird, und der auf dem bildgebenden Medium dargestellten Distanz zwischen zwei Objekten. Dies beeinträchtigt die Abstandswahrnehmung. Es gibt zwar Möglichkeiten, dem entgegenzuwirken (Andersen, 2011). Allerdings spielen diese Tiefeninformationen nur in einem Entfernungsbereich bis 2 m (Cutting & Vishton, 1995) oder bis 6 m (Birbaumer & Schmidt, 2006) eine Rolle. Monokulare Tiefeninformationen werden in der Regel von Fahrsimulatoren bzw. der Software simuliert (Knappe, 2009). Atmosphärische Tiefe wird dabei unabdingbar durch die begrenzte Auflösung des bildgebenden Mediums erzeugt (Knappe, 2009).

2.4.3 Grundlagen vestibulärer Informationswahrnehmung

Physiologische Grundlagen

Die Wahrnehmung von Bewegung und Lage im Raum erfolgt über propriozeptive Reize und findet im Innenohr des Menschen, im Vestibulärapparat, statt (Abbildung 2.6). Er besteht aus der Cupula mit drei Bogengängen (semizirkuläres System) und zwei Makulaorganen (Utriculus, Sacculus) (Fischer, 2009; Zenner, 2006; Frings & Müller, 2014). Über die drei Bogengänge wird jeweils eine Rotationsbeschleunigung im kartesischen Koordinatensystem registriert (Fischer, 2009; Tomaske & Meywerk, 2006). Eine Flüssigkeit als Trägheitsmasse bewirkt hierbei eine Auslenkung haarähnlicher Rezeptoren bei Beschleunigung; die Rezeptoren leiten den Reiz zum Kleinhirn weiter und ermöglichen es, die Lage des Körpers im Raum zu bestimmen (Zenner, 2006; Frings & Müller, 2014). Während Drehbeschleunigungen so vestibulär wahrgenommen werden, können Informationen zu Drehraten nur visuell aufgenommen werden (Tomaske & Meywerk, 2006). Im Utriculus werden translatorische Beschleunigungen in horizontaler Richtung wahrgenommen, während der Sacculus die Beschleunigungen in vertikale Richtung aufnimmt (Zenner, 2006).

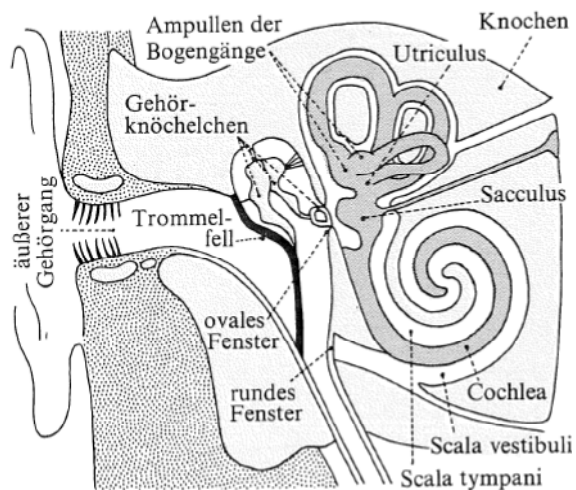


Abbildung 2.6: Menschliches Ohr mit Vestibulärapparat (Miram, 1978).

Vestibuläre Wahrnehmung im Fahrsimulator

Die Beschleunigungswahrnehmung im Fahrsimulator wird gemäß Abbildung 2.7 maßgeblich durch den angewandten Bewegungsalgorithmus (Motion Cueing Algorithmus, MCA) und die Dynamik des eingesetzten Bewegungssystems beeinflusst. Ein gängiges Bewegungssystem, welches die Steuerbefehle des MCA in vom Probanden wahrnehmbare Bewegungen umsetzt, ist das Hexapod. Das ursprünglich in Flugsimulatoren eingesetzte Bewegungssystem ist auch unter der Bezeichnung „Stewart-Plattform“ bekannt und besteht aus sechs hydraulisch oder elektrisch angetriebenen Linearaktuatoren, die so sechs Freiheitsgrade darstellen (Fischer, 2009). Durch den Einsatz zusätzlicher Verfahrenssysteme lassen sich höhere translatorische Dynamiken darstellen. Die Gierbeschleunigung kann durch Drehteller erweitert werden (Tomaske & Meywerk, 2006), während Vertikaldynamiken wie Straßenunebenheiten durch Linearzylinder dargestellt werden können (Kraft, 2010).

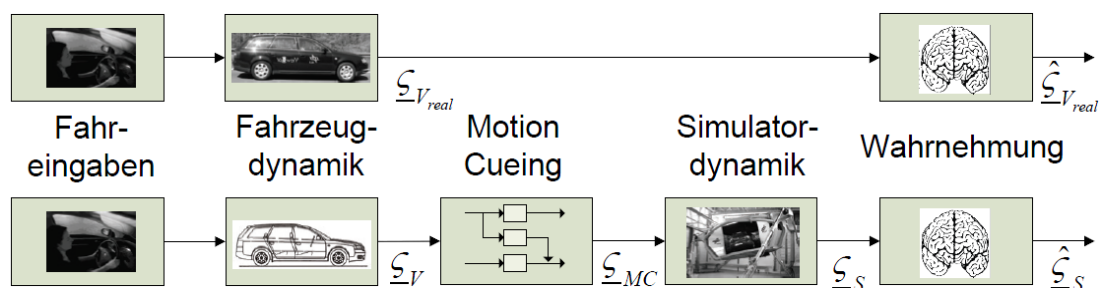


Abbildung 2.7 Aktionskette im Realfahrzeug (oben) und im Fahrsimulator (unten) (Fischer, 2009).

Unter dem Begriff des Motion Cueing werden akustische, visuelle, haptische und vestibuläre Reize zur Rückmeldung des Bewegungszustands zusammengefasst (Fischer, 2009).

Es lassen sich vier Fehlertypen der Bewegungssimulation nennen (Grant, 1995):

- Richtungsbezogen oder zeitpunktsbezogen falsche Reize
- Fehlende Reize
- Zeitlich verzögerte Phasenfehler
- Deutliche Amplitudendifferenzen zwischen der präsentierten und der erwarteten Beschleunigung (Skalierungsfehler)

Die Fahrdynamik des simulierten Fahrzeugs kann zudem nicht unmittelbar auf die Bewegungsplattform eines Simulators übertragen werden, da die Bewegungssysteme in ihrem Arbeitsraum und in ihrer Dynamik begrenzt sind (Fischer, 2009).

An dieser Stelle schafft der Motion Cueing Algorithmus Abhilfe, der die berechneten Fahrzeugbeschleunigungen überwiegend über Skalierungsfaktoren und das Prinzip der Tilt Coordination an die Möglichkeiten des Bewegungssystems anpasst (Weiß, 2006). Die Tilt Coordination transformiert lang anhaltende translatorische Beschleunigungen in Neigungen der Bewegungsplattform (Weiß, 2006). Hierbei wird die Tatsache ausgenutzt, dass das menschliche Vestibulärorgan nicht zwischen einer translatorischen Beschleunigung und der Neigung des Kopfes unterscheiden kann (Fischer, 2009). Die Wahrnehmungsschwelle des Menschen hinsichtlich Drehbeschleunigung liegt bei ca. $4 \text{ }^\circ/\text{s}^2$; sie darf bei Anwendung des Tilt Coordination Prinzips nicht überschritten werden, da der Mensch sonst merkt, dass eine Neigung und keine translatorische Beschleunigung erfolgt (Fortmüller, 2003). So können gemäß Mittelstädt (1983) Winkel bis zu $20\text{-}30^\circ$ und somit Beschleunigungen von $0,34\text{-}0,5 \text{ g}$ (Fischer, 2009) simuliert werden. Fortmüller (2003) hingegen definiert einen konservativeren Grenzwert von 21° Neigung und eine Beschleunigung von maximal $3,5 \text{ m/s}^2$. Zwei wesentliche Voraussetzungen für die Anwendung dieser Sinnestäuschung sind jedoch zu beachten: dem Probanden darf es nicht möglich sein, durch einen Blick aus dem Fahrsimulator heraus einen Bezug zu dem ihn umgebenden, feststehenden Raum herzustellen, da die Sinnestäuschung so bemerkt werden würde; zudem muss die visuelle Informationsdarstellung mit der Bewegungssimulation übereinstimmen (Greenberg & Blommer, 2011). Mit Hilfe eines in den MCA integrierten Skalierungsfaktors lassen sich zudem translatorische und rotatorische Beschleunigungen reduzieren und abgemildert an die Bewegungsplattform senden; so können insgesamt höhere Beschleunigungskräfte abgebildet werden (Weiß, 2006). Der Mensch nimmt Beschleunigungen nicht absolut, sondern nur relativ wahr, was hier ausgenutzt wird (Sammet, 2007). Ein häufig angewandter Skalierungsfaktor liegt bei $0,5$; für weitere Ausführungen sei auf Fischer (2009) verwiesen. Dabei sind die Wahrnehmungsschwellen, unter denen der Mensch keine Beschleunigungen mehr wahrnimmt, zu beachten.

2.4.4 Fazit

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, spielt die Informationswahrnehmung bei der Fahrzeugführung eine entscheidende Rolle. Insbesondere über den visuellen und den vestibulären Kanal nimmt der Mensch die wesentlichen Informationen auf, die er für die Führung des Fahrzeugs benötigt. Ebenfalls wurde bereits kurz darauf eingegangen, wie die Informationswahrnehmung bei Menschen physiologisch betrachtet abläuft. Unabdingbar für diese Reizaufnahme ist jedoch die Reizbereitstellung durch den Fahrsimulator. Auch hierauf wurde bereits mit einem technischen Fokus kurz eingegangen. Offen bleibt jedoch die Frage, welcher informationstechnische Zusammenhang und Ablauf zwischen der Informationsbereitstellung und der Verarbeitung dieser durch den Menschen besteht und wie sich so letztlich verschiedene Szenarien und Fahrsimulator-Gestaltungsparameter auf das Fahrerverhalten und somit auf die Validität auswirken. Dies wird im folgenden Kapitel näher thematisiert.

3 Modellbildung

In diesem Kapitel wird auf die Modellbildung näher eingegangen. Ziel dieser Betrachtung ist, den Einfluss von Untersuchungsszenario und Gestaltungsparametern eines Fahrsimulators auf die einzelnen Kennwerte der Fahrerhaltensvalidität auf theoretischer Ebene herzuleiten.

Eine modellbasierte Betrachtung des Zusammenhangs der unabhängigen Variablen Szenario und Gestaltungsparameter eines Fahrsimulators (Soft- und Hardware) auf die abhängigen Variablen (Handlungs- und Beanspruchungskennwerte) findet sich bereits in Zöllner, Mautes, Ren & Abendroth (2015b). Ziel des in Abbildung 3.1 dargestellten Modells ist es, den angesprochenen Zusammenhang zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen der Validitätsanalyse anhand des Informationsverarbeitungsprozesses des Menschen zu erläutern. Hierbei liegt der Fokus nicht auf den Einflüssen einzelner Gestaltungsparameter auf die jeweiligen Handlungs- und Beanspruchungskennwerte, sondern auf einer allgemeineren, übergeordneten Betrachtung des Wirkungszusammenhangs auf Informationsverarbeitungsebene.

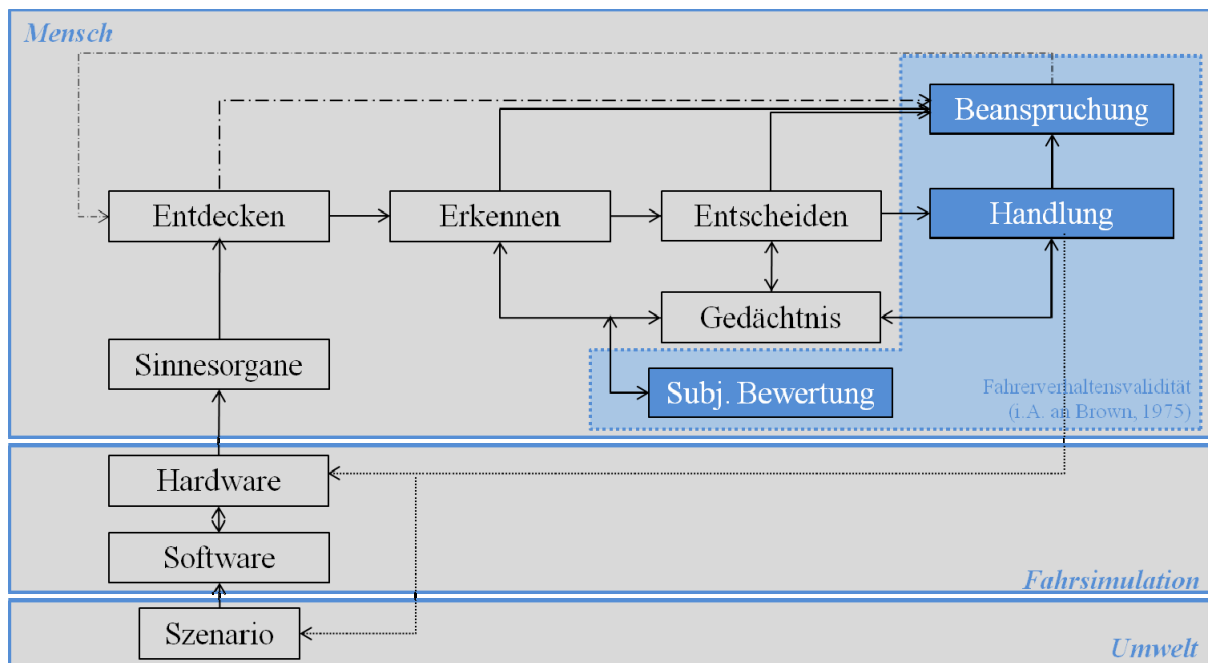


Abbildung 3.1: Erste Detaillierungsstufe des Modells (Zöllner et al., 2015b).

Wie das Modell (Abbildung 3.1) zeigt, interagiert der Fahrer mit dem Fahrsimulator und seiner Umwelt. Das in einer Untersuchungsreihe dargebotene Szenario wird in der Fahrsimulatorsoftware zunächst modelliert und dem Fahrer schließlich über das bildgebende Medium sowie weitere Hardware-Gestaltungsparameter dargeboten. Diese Reize werden vom Menschen über die Rezeptoren der Sinnesorgane aufgenommen und verarbeitet (Allen et al., 2011; Bruder & Didier, 2012). Dabei nimmt jeder Rezeptor eine bestimmte Informationsart (Modalität) wahr. Die Informationsverarbeitung lässt sich gemäß dem Ansatz von Luczak (1975) untergliedern in die Schritte des Entdeckens, Erkennens, Entscheidens und Handelns. Innerhalb dieses Prozesses gibt es verschiedene Wirkungen und Rückkopplungen, die in Zöll-

ler et al. (2015b) näher ausgeführt und in der Abbildung gekennzeichnet sind. Hierbei handelt es sich bei gestrichelter Pfeildarstellung um langfristige Wirkungsketten, die sich aus einem Ermüdungseffekt heraus ergeben, während durchgezogene Pfeile einen direkten, kurzfristigen Zusammenhang postulieren. Das Modell zeigt, dass sowohl das Szenario als umweltbezogene Variable als auch die Hard- und Softwarekomponenten als fahrsimulatorbezogene Variablen die Fahrerverhaltensvalidität, die durch Handlungs- und Beanspruchungskennwerte sowie die subjektive Bewertung der Probanden bestimmt wird, beeinflussen.

Welche genauen Zusammenhänge zwischen verschiedenen Gestaltungsparametern eines Fahrsimulators und dessen Validität bestehen, kann mit Hilfe des beschriebenen Modells jedoch nicht direkt erklärt werden. Zu diesem Zweck wird eine zweite Detaillierungsstufe der Modellbetrachtung eingeführt.

Das detailliertere Modell (Abbildung 3.2) geht aus der ersten Detailstufe hervor, indem ausgewählte Prozessbestandteile näher betrachtet werden, während die ersten Schritte der Informationsverarbeitung bis zur Handlung als „Blackbox“ dargestellt werden, da sie für die Ausführung an dieser Stelle nicht relevant sind. Auch Rückwirkungen, wie sie beispielsweise noch in der ersten Detaillierungsstufe zwischen Handlung und Hardware eingezeichnet sind, werden ausgespart, um die Übersichtlichkeit zu wahren.

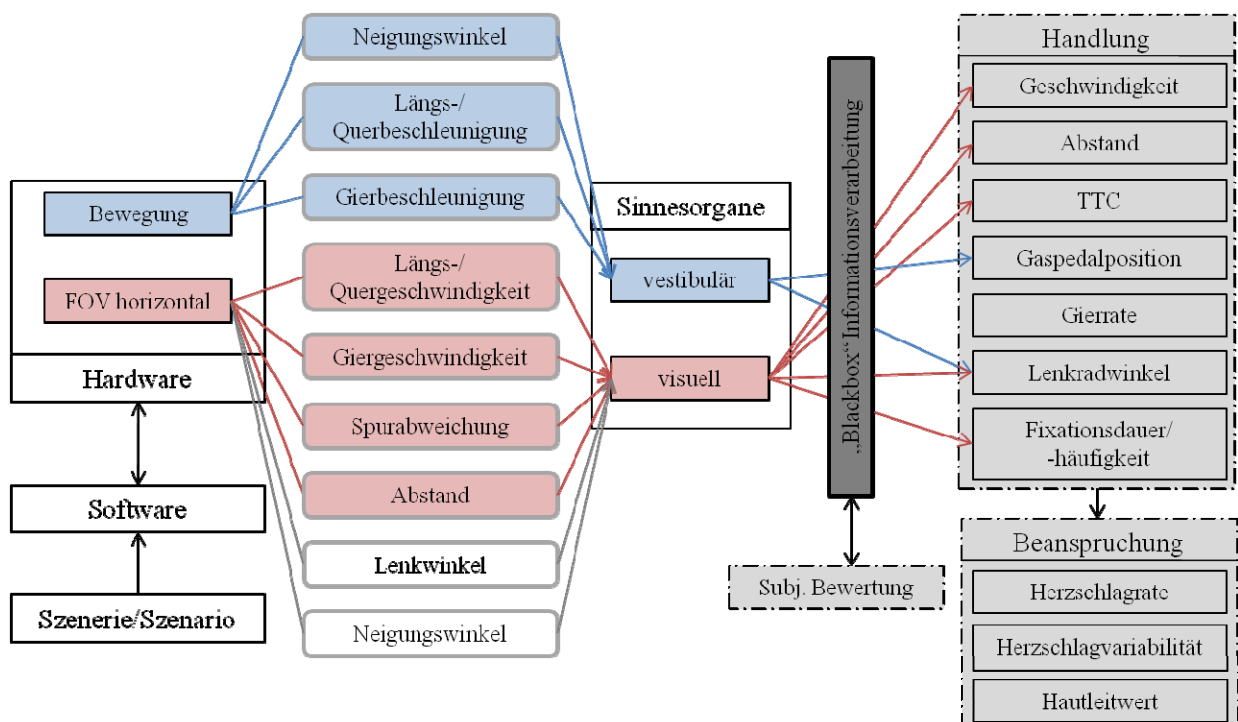


Abbildung 3.2: Zweite Detaillierungsstufe des Modells.

Ziel dieser zweiten Detailbetrachtung ist es vielmehr, den Zusammenhang zu zeigen, der sich zwischen einer Variation ausgewählter Gestaltungsparameter eines Fahrsimulators und den Handlungs- sowie Beanspruchungskennwerten ergibt. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei

auf der Wahrnehmungsphysiologie des Menschen. Alternative Herleitungsansätze können sich aus der Immersion in das Fahrgeschehen einer simulierten Umgebung sowie aus Theorien und Modellen der menschlichen Informationsverarbeitung ergeben; diese Ansätze werden hier jedoch nicht betrachtet.

Konkret lässt sich mithilfe des detaillierteren Modells zeigen, wie eine Ausweitung der Gestaltungsparameter FOV horizontal und Bewegungssimulation in Richtung einer höheren Darstellungsgüte auf verschiedene Handlungs- und Beanspruchungskennwerte und somit auf die Validität wirken. Mit Hilfe dieser Zusammenhangsanalyse können Hypothesen für die im Späteren vorgestellte Validierungsstudie hergeleitet werden.

Dass die Sichtsimation und die Bewegungsdarstellung eine entscheidende Rolle für die Übertragbarkeit von Ergebnissen zwischen realer und simulierter Umgebung darstellen, belegen bereits Mullen et al. (2011). Im Bereich der visuellen Darbietung bieten sich zahlreiche Gestaltungsparameter an. Als wesentlich erweist sich jedoch in diesem Bereich der horizontale Sichtwinkel, der u. a. die Geschwindigkeitswahrnehmung beeinflusst (Jamson, 2001).

Im Bereich der Handlungs- und Beanspruchungskennwerte werden diejenigen Größen betrachtet, die im Rahmen einer auf einer Literaturrecherche aufbauenden Expertenbefragung (Kap. 4.4.1) als relevant für die Validierung eines Fahrsimulators eingestuft wurden.

Obigen Ausführungen zufolge zielt das detailliertere Modell nicht auf eine vollständige Darstellung ab; es soll vielmehr zeigen, wie eine Herleitung von Zusammenhängen zwischen unabhängigen und abhängigen Variablen im Kontext der Validitätsanalyse von Fahrsimulatoren wahrnehmungsphysiologisch erfolgen kann. Das Vorgehen kann auf andere Gestaltungsparameter ebenso übertragen werden wie auf weitere Handlungs- und Beanspruchungskennwerte.

Die in der zweiten Detaillierungsstufe des Modells (Abbildung 3.2) dargestellten Zusammenhänge und Wirkungsweisen sollen zunächst grundlegend erläutert werden.

Das Untersuchungsszenario, welches einer Versuchsreihe zugrunde liegt, wird im Vorfeld in der Simulationssoftware modelliert und dem Fahrer schließlich über Hardwarekomponenten bereitgestellt. Die einzelnen Hardware-Komponenten stellen verschiedene fahrzeugführungsrelevante Informationen bereit (abgerundete Kästchen in Abbildung 3.2). Die von den Gestaltungsparametern bereitgestellten Informationen werden vom Menschen über die Sinnesorgane aufgenommen und verarbeitet („Blackbox“ des Informationsverarbeitungsprozesses in Abbildung 3.2). Der Mensch beurteilt in diesem Zusammenhang den Realitätsgrad der dargebotenen simulierten Umgebung (subj. Bewertung), der wiederum die Immersion in das Fahrgeschehen und somit die weitere Informationsverarbeitung hin zur Handlung beeinflusst. Die Handlung sowie auch die daraus resultierende Beanspruchung lassen sich über verschiedene Kennwerte messen.

Nach der grundlegenden Modellerläuterung wird nun vertiefend auf den Zusammenhang zwischen einer Ausweitung der Gestaltungsparameter FOV horizontal bzw. der Bewegung, der

daraus resultierenden Informationsbereitstellung an den Menschen und schließlich der Verhaltensbeeinflussung eingegangen.

Der horizontale Sichtwinkel (FOV) liefert wesentliche Informationen, die der Fahrer für die Fahrzeugführung benötigt und über den visuellen Sinneskanal aufnimmt (in Anlehnung an Tomaske & Meywerk, 2006). Hierbei ist im Modell zu unterscheiden zwischen Informationen, die von einer Sichtwinkelerweiterung unbeeinflusst bleiben (weiß hinterlegte Kästchen in Abbildung 3.2) und denjenigen Informationen, die bei einer Veränderung des horizontalen Sichtwinkels eine geänderte Information darbieten und somit den Fahrer in seinem Verhalten beeinflussen (rot hinterlegte Kästchen in Abbildung 3.2). Wie diese Zweiteilung der Informationen zu begründen ist, wird im Folgenden erläutert.

Bei der visuellen Wahrnehmung kann zwischen einem fovealen und einem peripheren Bereich unterschieden werden. Eine Erweiterung des Sichtwinkels hat eine Vergrößerung der dargebotenen Peripherie zur Folge. Entsprechend werden nur peripher wahrgenommene Informationen von einer Gestaltungsparameter-Ausweitung beeinflusst. Eine Peripherieerweiterung wirkt sich auf den vom Probanden wahrgenommenen optischen Fluss aus (Schwarz, 2011). Beim Autofahren trägt dieser optische Fluss zum räumlichen Tiefensehen (Grüsser & Grüsser-Cornehls, 1987; Kemeny & Panerai, 2003) und letztlich zur relativen Geschwindigkeitswahrnehmung (Andersen, 2011; Beusmans, 1998; Lee, 1980), Einschätzung von Abstandsänderungen (Beusmans, 1998; Lee, 1980) sowie zur Wahrnehmung der Richtung der Eigenbewegung (Gibson, 1950) und somit der Steueraufgabe (Knappe, 2009) bei. Neben dem optischen Fluss liefert die Peripherie auch mittels optischen Führungselementen wie Leitplanken, Bepflanzungen, etc. entlang der Strecke eine wichtige Information für die Fahrzeugführung (Biedermann, 1984).

Infolge der beschriebenen Zusammenhänge wirkt sich eine Erweiterung des horizontalen Sichtwinkels, ungeachtet der Größe der Ausdehnung, auf die Wahrnehmung von Längs-/Quergeschwindigkeitswahrnehmung (u. a. Schwarz, 2011; Tomaske & Meywerk, 2006; Tomaske, 1983), Spurabweichung (u. a. Land & Horwood, 1995; Schweigert, 2003) sowie Abstand bzw. der damit in Verbindung stehenden time to collision (Bremmer & Lappe, 1999) aus. Die veränderte Wahrnehmung der genannten Informationen reflektiert sich, objektiv messbar, in der Handlung und Beanspruchung des Menschen. Geschwindigkeits- und Abstandswahl sowie TTC werden bei einer Sichtwinkelerweiterung beeinflusst. Zudem wirkt sich eine erweiterte Peripherie, über die sensorische Kontrolle der Umgebung (Orientierungsaufgabe) sowie über die kognitive Kontrolle der Umgebung (Sakkadensteuerung), auf das Blickverhalten des Menschen aus (Kayser et al., 1989). Demgegenüber spielt bei der Erfassung des Lenkradwinkels foveales Sehen eine Rolle. Allerdings wird der Lenkradwinkel insoweit durch eine Sichtwinkelerweiterung beeinflusst, als dass die Spurposition bei einer Peripherieerweiterung besser wahrnehmbar ist und so weniger Lenkkorrekturen notwendig sind.

Neben diesen objektiven Kennwerten wird angenommen, dass sich der subjektiv empfundene Realitätsgrad mit einer Erweiterung des Sichtwinkels horizontal signifikant erhöht. Diese Annahme ist auf die mit einer Erweiterung eines Gestaltungsparameters verbundene Erhöhung der Darstellungsgüte gestützt. Die Realitätsnähe der simulierten Umgebung steigt, was vom Menschen entsprechend über seine Sinnesorgane wahrgenommen wird.

Gleichsam ist aufgrund der erhöhten Darstellungsgüte bei Parameter-Erweiterung damit zu rechnen, dass die Beanspruchung (u. a. Herzschlagrate, Herzschlagvariabilität und Hautleitwert) der Probanden in simulierter Umgebung der in realer Umgebung zunehmend nahe kommt. Je realistischer ein Proband eine Fahrt im Fahrsimulator empfindet, desto eher wird er sein Fahrverhalten an das in realer Umgebung angleichen und so letztlich die gleiche Beanspruchung erfahren. Liegt hingegen eine sehr geringe Darstellungsgüte im Fahrsimulator vor, ist die Künstlichkeit der Umgebung für den Probanden unmittelbar präsent; dies kann dazu führen, dass er eigentlich kritischen Situationen mit Gelassenheit und einer geringen Beanspruchung begegnet, da er sich des geringen Gefährdungspotentials in simulierter Umgebung bewusst ist.

Bewegungsreize, dargeboten von einer Bewegungssimulation, werden vom Probanden vestibulär aufgenommen (in Anlehnung an Tomaske & Meywerk, 2006). Es handelt sich hierbei um Informationen zum Neigungswinkel, zur Längs- und Querbeschleunigung sowie auch zur Gierbeschleunigung (u. a. Fischer, 2009) (blau hinterlegte Kästchen in Abbildung 3.2). Die Einschätzung der Längs- und Querbeschleunigung kann dabei als einzige Information auch haptisch bspw. über das Lenkradrückstellmoment unterstützt werden (Tomaske, 1983; Tomaske & Meywerk, 2006). Das Fehlen oder Vorhandensein von Beschleunigungskräften beeinflusst entsprechend die Wahrnehmung des Menschen. Hier ist davon auszugehen, dass die Standardabweichungen des Gaspedals und des Lenkradwinkels durch die verbesserte Beschleunigungswahrnehmung bei aktiver Plattform beeinflusst werden. Ferner wird auch für diese Gestaltungsparameter-Ausweitung davon ausgegangen, dass sich durch Hinzuschaltung einer Bewegungssimulation der subjektiv empfundene Realitätsgrad erhöht und die Beanspruchungswerte entsprechend realitätsnäher ausfallen.

Inwiefern die im Modell angenommenen Beziehungen Geltung haben, wird im Rahmen einer Validierungsstudie empirisch untersucht. Das entsprechende Untersuchungskonzept sowie die Ziele werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

4 Untersuchungskonzept der Validierungsstudie

4.1 Untersuchungsziel und Leithypothesen

Ziel der im Folgenden vorgestellten Validierungsstudie ist es, die zwei in Kap. 2.3.8 aus den bisherigen Forschungen abgeleiteten Forschungsfragen nach dem Einfluss ausgewählter Gestaltungsparameter und des jeweiligen Untersuchungsszenarios auf die Fahrerverhaltensvalidität zu beantworten. Dazu wurden in einem ersten Schritt theoretische Überlegungen ange stellt, die in die Bildung des vorgestellten Modells (Kap. 3) geflossen sind. Dies empirisch zu evaluieren ist das grundlegende Ziel der Untersuchungsreihe. Dabei wird sowohl auf ein methodisch korrektes Vorgehen als auch auf eine umfassende Berücksichtigung von Validitätskennwerten geachtet, um die an bisherigen Validierungsstudien kritisierten Aspekte konstruktiv für eine optimale Ergebniserhebung zu nutzen.

Aus den hinter der Versuchsreihe stehenden Forschungsfragen lassen sich Leithypothesen aufstellen, die es zu verifizieren oder zu verwerfen gilt. Diese Hypothesen sind mit dem jeweiligen Analyseansatz in Tabelle 4.1 dargestellt. Eine Detaillierung der Annahmen in spezifische Forschungshypothesen findet, nach der Versuchskonzeptvorstellung, in Kapitel 4.8 statt.

Die Leithypothesen LH₁-LH₄ beziehen sich auf die Untersuchung der absoluten Fahrerverhaltensvalidität, indem sie einen Vergleich von im Feld und im Simulator gewonnenen objektiven Kennwerten vornehmen. Verglichen werden dabei mit Hilfe der Inferenzstatistik die Mittelwerte aus beiden Untersuchungsumgebungen, wobei als Hypothese angenommen wird, dass sie sich signifikant unterscheiden. Sofern diese Annahme verworfen werden kann, kann dies im Umkehrschluss als Indiz für absolute Validität interpretiert werden.

Sofern sich für keine der vier Fahrsimulatorfahrten (Parameterset 1-4) Gleichheit der Mittelwerte mit denen der Feldfahrten zeigt, tritt Analyseschritt 2 und somit LH₅ ein, bei der die Simulatorfahrten untereinander verglichen werden. So kann geprüft werden, ob sich die Fahrten in simulierter Umgebung signifikant voneinander unterscheiden oder nicht. Aus dem so ggf. gefundenen Indiz für einen Parametereinfluss kann die vage Vermutung geäußert werden, ob eine weitere Ausweitung des jeweiligen Gestaltungsparameters im Sinne einer Erhöhung der Darstellungsgüte des Fahrsimulators ggf. zu validen Ergebnissen führen kann. Überprüft werden kann diese Vermutung jedoch mit Hilfe dieser Versuchsreihe nicht.

Die Leithypothese LH_R bezieht sich nicht auf die objektiven, sondern auf die subjektiven Kennwerte der Fahrerverhaltensvalidität. Hier wird mit Hilfe einer ANOVA mit Messwiederholung und ggf. einem nachfolgenden Mittelwertvergleich untersucht, ob sich der subjektiv empfundene Realitätsgrad einer Fahrsimulatorfahrt zwischen den vier Parametersets signifikant unterscheidet.

Mit Hilfe von Leithypothese LH_S wird schließlich Bezug genommen auf den Einfluss des Untersuchungsszenarios. Hier findet jedoch nur eine deskriptive Betrachtung statt, da aus dieser keine neuen Erkenntnisse zur absoluten Fahrerhaltensvalidität an sich gezogen werden können.

Tabelle 4.1: Leithypothesen.

Code	Aussage	Analyseansatz
LH ₁	Die objektiven Validitätskennwerte (Handlung und Beanspruchung) im Fahrsimulator (Parameterset 1) und Feld unterscheiden sich signifikant.	Mittelwertvergleich (Inferenzstatistik)
LH ₂	Die objektiven Validitätskennwerte (Handlung und Beanspruchung) im Fahrsimulator (Parameterset 2) und Feld unterscheiden sich signifikant.	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set } i}$ → Absoluter Vergleich zwischen Feld und Fahrsimulator (Indiz für absolute Fahrerhaltensvalidität)
LH ₃	Die objektiven Validitätskennwerte (Handlung und Beanspruchung) im Fahrsimulator (Parameterset 3) und Feld unterscheiden sich signifikant.	
LH ₄	Die objektiven Validitätskennwerte (Handlung und Beanspruchung) im Fahrsimulator (Parameterset 4) und Feld unterscheiden sich signifikant.	
LH ₅	Es gibt einen signifikanten Parametereinfluss auf die objektiven Validitätskennwerte in einem Fahrsimulator.	
LH _R	Es gibt einen signifikanten Parametereinfluss auf den subjektiv empfundenen Realitätsgrad einer Fahrsimulatorfahrt.	Messwiederholung, Mittelwertvergleich (Inferenzstatistik) $\mu_{\text{Set } i} < \mu_{\text{Set } ii} \text{ bzw. } \mu_{\text{Set } i} > \mu_{\text{Set } ii}$ → Relativer Vergleich zwischen verschiedenen Parametersets (Indiz für Parametereinfluss)
LH _S	Die Ergebnisse objektiver Validitätskennwerte unterscheiden sich zwischen verschiedenen <u>Szenarien</u> .	(Deskriptiv) → Indiz für Szenarieneinfluss

Auf die statistischen Grundlagen wird an späterer Stelle noch einmal vertiefend eingegangen. Im Folgenden werden zunächst die grundlegenden Anforderungen an das Versuchsdesign sowie das komplette Untersuchungskonzept vorgestellt.

Die Durchführung und Auswertung der Untersuchungsreihe wird durch studentische Arbeiten unterstützt; diese sind im Anhang aufgeführt.

4.2 Anforderungen an das Versuchsdesign

Es werden verschiedene Anforderungen an das Versuchsdesign gestellt, die als Rahmenbedingung für die Konzeptionierung anzusehen sind. Diese ergeben sich zum einen aus der Zielsetzung, eine wissenschaftlich korrekte Validierungsmethodik anzuwenden, und zum anderen aus allgemeinen Anforderungen an eine fundierte Versuchsplanung.

Anforderungen aus der Validierungsmethodik

Gemäß Brown (1975) setzt eine Untersuchung der Fahrerverhaltensvalidität eines Fahrsimulators Versuche in realer und simulierter Umgebung voraus, die unter identischen Bedingungen stattfinden. Identische Bedingungen werden im Rahmen dieser Studie sichergestellt durch ein identisches Probandenkollektiv in beiden Versuchen sowie durch einen möglichst realgetreuen Streckennachbau in der Simulationssoftware. Die begrenzte, zentrale Verarbeitungskapazität des Menschen bei einer Fahrt am Tag führt jedoch zu einer lückenhaften Aufnahme und Verarbeitung von Informationen; die durchschnittliche Zahl der fixierten Objekte beträgt 3 Stück pro Sekunde (Cohen, 1994). Bei der Streckenmodellierung in der Simulationssoftware liegt daher der Schwerpunkt weniger auf einer 1:1 Abbildung von real existierenden Häusern oder einzelnen Umgebungsobjekten. Vielmehr werden die Streckenverläufe und -geometrien aus der Realität auf die simulierte Strecke übertragen. Die Umgebung wird ebenfalls der Realität nachempfunden, jedoch nur bzgl. der generellen Umgebungslandschaft (Bebauung, Wälder, freie Felder). Zur identischen Versuchsgestaltung in realer und simulierter Umgebung gehört auch eine Erhebung der gleichen Daten, anhand derer auf die Validität geschlossen wird. Im Rahmen der hier vorgestellten Studie sollen drei der vier von Brown (1975) genannten Analysekategorien Anwendung finden, um eine möglichst vielseitige Datenerfassung sicherzustellen. So werden fahrdynamische und fahrerverhaltensbezogene Kennwerte ebenso gemessen wie physiologische und subjektive Kennwerte. Die von Brown (1975) ebenfalls angesprochene Möglichkeit der Evaluation des Transfers von Trainingseffekten in beiden Untersuchungsumgebungen erscheint vor dem Hintergrund von kurzzeitigen Probandenstudien wenig sinnvoll, da Trainingseffekte erst nach einer gewissen Zeit auftreten. Um Änderungen des Fahrerverhaltens eindeutig auf den Einfluss eines Gestaltungsparameters beziehen zu können, ist es zudem wichtig, die Parameter einzeln und gezielt zu variieren, während der übrige Simulator- und Versuchsaufbau unverändert bleibt.

Anforderungen aus dem versuchsplanerischen Blickwinkel

Neben den Anforderungen aus der Validierungsmethodik gibt es ferner versuchsplanerische Aspekte, die einzuhalten sind.

Hussy & Jain (2002) definieren folgende Arten von Effekten, die es zu verhindern gilt: **Sensibilisierung, Reihenfolgeeffekt, Übungseffekt, Ermüdungseffekt**. Um den genannten Effekten entgegenzuwirken, kommt ein interindividuell ausbalancierter Versuchsplan zum Einsatz (Hussy & Jain, 2002), der eine Randomisierung der Randbedingungen ebenso vorsieht wie eine Aufteilung der Simulatorversuche auf zwei Versuchstage, die für alle Probanden in einem zeitlich gleichen Abstand liegen. Durch die Aufteilung des Versuchs auf zwei Tage kann nicht nur einer aufkeimenden Ermüdung vorgebeugt werden. Bei Fahrversuchen im Fahrsimulator kommt zusätzlich das Problem der Simulatorkrankheit zum Vorschein, welches es bereits bei der Versuchsplanung zu berücksichtigen gilt. So ist nicht nur mit einer erhöhten Ausfallzahl von Probanden und somit mit einer umfangreicheren Probandenakquise zu rechnen. Vielmehr sind auch wichtige Maßnahmen wie Eingewöhnungsfahrten einzuplanen, die gemäß Hoffmann & Buld (2006) das Auftreten von Simulatorübelkeit reduzieren können.

4.3 Versuchsaufbau

4.3.1 Versuchsstrecke und Szenarien

Bei der Konzeption der Versuchsstrecke für die Validierungsstudie steht der Grundgedanke im Vordergrund, eine Validierung zunächst für „Normalverhalten“ vorzunehmen, bevor unfallkritisches Verhalten in spezifischen Situationen untersucht wird. Die Untersuchung von Normalverhalten der Probanden ist, aufgrund der mit diesem verbundenen hohen Ereignishäufigkeit (Klebensberg, 1982; siehe Abbildung 4.1), von hoher Bedeutung für die Erforschung des Fahrerverhaltens und somit die fahrerverhaltensbezogene Validierung.

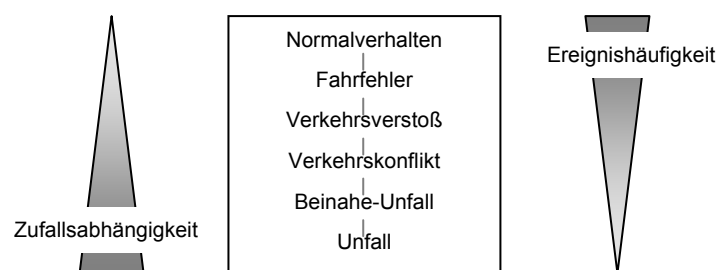


Abbildung 4.1: Kontinuum des Verkehrsverhaltens (Klebensberg, 1982).

Neben der Verhaltensbetrachtung auf Menschseite ist auch die Komplexität der Umgebung, in der sich der Fahrer befindet, wichtig zu beachten. Gemäß Fastenmeier (1995) lassen sich verschiedene Aufgabenkomplexitäten in Abhängigkeit der Verkehrssituation definieren:

- **Gering:** Autobahnen, Landstraßen, Stadtfahrten mit geringem Verkehrsaufkommen und geraden, knotenfreien Verläufen
- **Mittel:** Autobahneinmündungen, Landstraßen mit Kurven und Steigungen, Stadtfahrten mit verengter Fahrbahn und Kurven, beschilderten und Vorrang für den Fahrer oder lichtzeichen-geregelten Knotenpunkten
- **Hoch:** Stadtfahrten mit beschilderten Kreuzungen und Wartepflicht für den Fahrer, Autobahn-auffahrten

Für die Validierungsstudie werden Szenerien ausgewählt, die „Normalverhalten“ im Sinne von Klebelsberg (1982) hervorrufen und zugleich alle drei Komplexitätsgrade nach Fastenmeier (1995) abdecken, um möglichst umfangreiche Daten zu generieren. Eine „Szenerie“ beinhaltet gemäß Geyer et al. (2013) die Geometrie vordefinierter Straßentypen wie Stadt, Landstraße und Autobahn. Hierzu zählen die Dimensionierung der Fahrstreifen ebenso wie der Streckenverlauf selbst und Schilder- sowie Ampelpositionen. Zudem sind auch Umgebungsobjekte wie Häuser, Bäume und andere Elemente Bestandteil einer Szenerie.

Gemäß Zöllner et al. (2013) werden folgende sog. „Grundszenerien“ als Bestandteile der Versuchsstrecke definiert:

- „**Stadt**“ (typische Charakteristika: 30-50 km/h zulässige Geschwindigkeit, hohe Verkehrsdichte, Ampeln / Verkehrszeichen, Abbiege-/ Bremsvorgänge)
- „**Landstraße**“ bzw. „**Überlandfahrt**“ (typische Charakteristika: 50-100 km/h zulässige Geschwindigkeit, ein Fahrstreifen je Richtung, teils verengte Fahrbahn, Waldpassagen)
- „**Autobahn**“ bzw. „**autobahnähnliche Landstraße**“ (typische Charakteristika: über 100 km/h zulässige Geschwindigkeit, mind. zwei Fahrstreifen je Richtung plus Seitenstreifen, Spurwechsel und Überholmanöver).

Wendet man die Klassifizierung von Fastenmeier (1995) auf die ausgewählten Szenerien an, handelt es sich bei Autobahn und Landstraße um einen geringen Komplexitätsgrad, während die Stadtpassage einen mittleren bis hohen Komplexitätsgrad besitzt.

Zur Gestaltung der Versuchsstrecke werden den definierten Grundszenerien entsprechende Straßenbereiche über Google Earth[®] im Verkehrsraum Darmstadt gesucht. Bei der Streckenkonzepktion wird zudem darauf geachtet, dass jede Szenerie in ca. 15 Minuten zu durchfahren ist, um eine Gesamtfahrlänge von 45-60 Minuten je Proband und Fahrt nicht zu überschreiten. Ziel ist es weiterhin, alle Szenerien so festzulegen, dass sie identische Start- und Endpunkte haben, um die Reihenfolge der Szenerien leicht permutieren zu können. Die ausgewählte Versuchsstrecke ist mit ihren Bestandteilen Stadt, Landstraße und Autobahn den Abbildung 4.2 bis Abbildung 4.3 zu entnehmen. Als Stadtszenerie wird ein für eine Stadtfahrt repräsentativer Streckenteil der östlichen Darmstädter Innenstadt gewählt, der 30 km/h und 50 km/h Zonen beinhaltet. Die Landstraßenpassage führt über die L3094, die die für eine Landstraße vorgeschriebenen Regelquerschnitte RQ9,5 (3 Meter Breite je Fahrstreifen) und RQ10,5 (3,5 Meter Breite je Fahrstreifen) (wikipedia.de) einhält. Hier gelten Geschwindigkeitslimits von 70 km/h bzw. 100 km/h. Für den Autobahnabschnitt ohne Geschwindigkeitsbegrenzung wird

vor dem Hintergrund einer zeitoptimalen Streckengestaltung nicht auf die entfernter gelegene A5 zurückgegriffen, sondern die Bundesstraße B26 von Darmstadt nach Dieburg gewählt. Sie erfüllt jedoch die Richtlinien für die Anlage von Autobahnen und kann daher als autobahnähnliche Landstraße herangezogen werden. Es handelt sich um die Kategorie RQ31 mit zwei 3,75 m breiten Fahrstreifen zuzüglich Seitenstreifen pro Richtung und einem Mittelstreifen von 4 m Breite (wikipedia.de).

Die Versuchsstrecke wird für die Simulatorversuche in SILAB nachmodelliert.

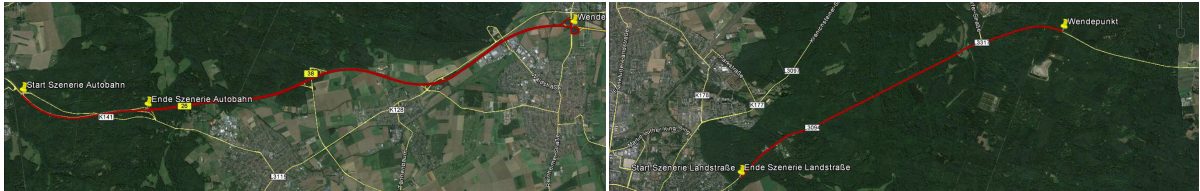


Abbildung 4.2: Google Earth® Ausschnitte der Szenerien Autobahn (links) und Landstraße (rechts).

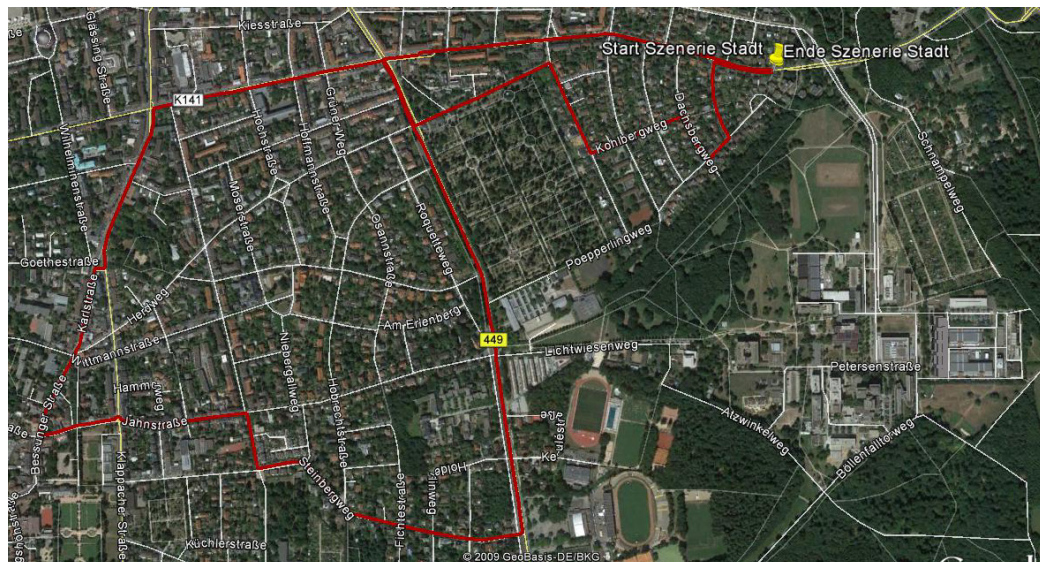


Abbildung 4.3: Google Earth® Ausschnitt der Szenerie Stadt.

Die einzelnen Szenerien der Versuchsstrecke werden weiter untergliedert in Szenarien (Tabelle 4.2). Ein „Szenario“ beinhaltet Geyer et al. (2013) zufolge eine Situation in einer Szene, die sich ihrerseits aus einer Szenerie, dynamischen Elementen (wie anderen Verkehrsteilnehmern) und ggf. Fahrhinweisen zusammensetzt.

Landstraße und Autobahn werden in die Szenarien Freie Fahrt und Folgefahrt eingeteilt. In der Literatur finden sich zur Einteilung dieser Szenarien häufig zwei scharfe Abgrenzungsmerkmale: Zeitlücke (u. a. Fastenmeier, 1998; Fecher, 2005) und Situationsdauer (Fecher, 2005). Die (Folge-) Zeitlücke ist dabei wie folgt definiert:

$$\text{Zeitlücke} = \frac{\text{Abstand zum Vorausfahrenden}}{\text{Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs}}$$

Fastenmeier (1998) definiert verschiedene ACC-relevante Fahrersituationen; demgemäß gilt eine Fahrt als Hinterherfahrt bzw. Folgefahrt, wenn die Folgezeitlücke einen Grenzwert von 2 Sekunden nicht überschreitet. Neben der Zeitlücke als Kriterium spielt gemäß Fecher (2005) auch die Situationsdauer und damit die Zeitdauer, in der das Zeitlückenkriterium erfüllt wird, eine Rolle. Eine Folgefahrt ist als stationärer Zustand anzusehen. Die von Fecher (2005) angegebene Mindestdauer von 10 Sekunden für eine Folgefahrt kann jedoch, gemäß seinen Aussagen, als sehr konservativ angesehen werden und wird daher auch in der vorliegenden Studie nicht übernommen. Es wird stattdessen eine Situationsdauer von mindestens 3 Sekunden festgelegt, in der sich der Fahrer auf die neuen Gegebenheiten einstellen kann.

Tabelle 4.2: Szenarien und Szenarien der Versuchsstrecke.

Szenerie	Szenario	Kodierung
Stadt	Abbiegevorgänge	S_A
	Ohne Richtungsänderung	S_O
	<i>Stadtszenerie gesamt</i>	<i>S_G</i>
Landstraße	Freie Fahrt	L_FrF
	Folgefahrt	L_FoF
	<i>Landstraßenszenerie gesamt</i>	<i>L_G</i>
Autobahn	Freie Fahrt	A_FrF
	Folgefahrt	A_FoF
	<i>Autobahnszenerie gesamt</i>	<i>A_G</i>

Der Folgefahrt gegenüber steht die Freie Fahrt, bei der der Proband von keinem vorausfahrenden Fahrzeug unmittelbar bei der Fahrzeugführung beeinflusst wird (Fecher, 2005; Fastenmeier, 1998). Fastenmeier (1998) nennt hier eine Zeitlücke größer 2 Sekunden als Kriterium. Dies wird jedoch als zu „unscharf“ eingestuft, da der Übergang zwischen Freier Fahrt und Folgefahrt fließend wäre. Um eine klare Abgrenzung zu treffen, wird für die Freie Fahrt eine Zeitlücke von mind. 3 Sekunden festgelegt. Der Bereich zwischen 2 und 3 Sekunden beschreibt einen dynamischen Wechselbereich (Fecher, 2005) und wird aus der Betrachtung ausgeschlossen. Die Situationsdauer wird in Anpassung an die Folgefahrt wiederum auf mind. 3 Sekunden festgelegt. Zudem wird als weiteres Kriterium eine eigene Fahrgeschwindigkeit von mind. 10 m/s definiert, um „Stop-and-Go“ Situationen auszuschließen. Auch Fecher (2005) definierte eine ähnliche Grenze von 30 km/h, die gemäß Fastenmeier (1998) Stop-and-Go Situationen definiert.

Die vorgestellten Abgrenzungskriterien für Freie Fahrt und Folgefahrt sind in Tabelle 4.3 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Abgrenzungskriterien der Szenarien Freie Fahrt und Folgefahrt.

	Folgefahrt (FoF)	Freie Fahrt (FrF)
Kriterium 1	$0 \text{ s} < \text{Zeitlücke} < 2 \text{ s}$	$\text{Zeitlücke} \geq 3 \text{ s} \ \& \ \text{Fahrgeschwindigkeit} \geq 10 \text{ m/s}$ <i>oder</i> $\text{Zeitlücke} = 0 \text{ s}$ und $\text{Fahrgeschwindigkeit} \neq \text{NaN}^5$
Kriterium 2	Situationsdauer $\geq 3 \text{ s}$	Situationsdauer $\geq 3 \text{ s}$

Die Stadtstrecke wird eingeteilt in die Szenarien Abbiegevorgänge und Ohne Richtungsänderung. Als Basis für die Kriterienfindung von Abbiegevorgängen dient eine Videoanalyse. Hierbei werden Kreuzungsdurchfahrten näher betrachtet, um eine Grenze vor und nach dem jeweiligen Kreuzungsmittelpunkt festzulegen, ab der der Probanden durch die bevorstehende Kreuzung in seinem Verhalten beeinflusst wird. Es zeigt sich die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung zweier Kreuzungstypen. Bei mehrspurigen, komplexen Kreuzungen beginnt der Abbiegevorgang bereits ca. 100 m vor dem Scheitelpunkt, während bei einspurigen Kreuzungen ein Betrachtungsbereich von ca. 50 m vor Kreuzungsmittelpunkt genügt. In beiden Fällen endet der Abbiegevorgang ca. 50 m nach dem Mittelpunkt. Als weiteres Szenario in der Stadt werden Abschnitte Ohne Richtungsänderung definiert. Diese Abschnitte beinhalten alle Streckenbereiche ohne Richtungsänderung, bei denen der Proband keine Vorfahrt zu gewähren hat und somit keine großen Geschwindigkeitsänderungen (z. B. aufgrund von Vorfahrtsregelungen) vornimmt.

Die Einteilung in die vorgestellten Szenarien erfolgt in Feld und Fahrsimulatorfahrt anhand der identischen Kriterien, sodass die beiden Untersuchungsumgebungen unmittelbar verglichen werden können.

4.3.2 Probandenkollektiv

Wie in Kapitel 2.3.8 erläutert, ist neben der identischen Streckengestaltung in Feld und Fahrsimulator ein identisches Probandenkollektiv eine wichtige Voraussetzung für eine Validierungsstudie. Entsprechend wird im Rahmen dieser Studie für beide Untersuchungsumgebungen auf identische Teilnehmer zurückgegriffen. So kann ein Einfluss individueller Leistungsvoraussetzungen sowie insbesondere unterschiedlicher Altersstrukturen auf die Daten ausgeschlossen werden.

Ziel ist es, eine hinreichend große Anzahl an Probanden zu akquirieren. Gemäß Bubb (2003) sind für einen Versuchsplan mit k verschiedenen Varianten $N = k!$ Probanden notwendig. Da in der Validierungsstudie vier verschiedene Parametersets untersucht werden, ergibt sich also eine Mindestanzahl von $N = 4! = 24$ Probanden. Für die Validierungsstudie wird eine ausreichend große Probandenzahl von mind. $N = 40$ Probanden angestrebt.

⁵ NaN beschreibt in der Informatik bzw. der Programmiersprache einen numerischen Datentyp-Wert, der für einen undefinierten oder nicht darstellbaren Wert steht (wikipedia.de).

Insgesamt werden schließlich $N = 42$ Probanden, 22 Männer und 20 Frauen, mit einem Altersdurchschnitt von 29,31 Jahren ($\sigma = 12,33$ Jahre) erhoben. Dabei sind 86% der Teilnehmer jünger als 40 Jahre und 14% älter als 50 Jahre.

4.3.3 Versuchsträger

Aus den Forschungsfragen und den damit verknüpften Leithypothesen ergeben sich zwei Anforderungen an den Fahrsimulator: zu- bzw. abschaltbare Bewegungsplattform und veränderbarer Sichtwinkel horizontal. Der dynamische Fahrsimulator in Abbildung 4.4 (links) erfüllt beide Voraussetzungen.

Der Fahrsimulator besteht aus einer Sitzkiste⁶ der Firma Fanatec, die auf einem Hexapod (Danaher Motion⁷) gelagert ist. Zur Sichtsimulation stehen drei 23“-Monitore (52 x 29 cm) mit einer Auflösung von 1920 x 1080 (Full HD) zur Verfügung, die jeweils einen Bildausschnitt von 60° horizontal und 27° vertikal darstellen. Motoren- und Umgebungsgeräusche werden über ein 5.1-Soundsystem ausgegeben. Sowohl das Lenkrad im Porsche 911 GT3 RS Design als auch die Pedalerie (ClubSport Pedals V2 EU, Fanatec) sind mit Force Feedback-Funktion ausgestattet und liefern dem Probanden so eine direkte haptische Rückmeldung zu seinen Bedieneingaben. Da der Simulator über keine Geschwindigkeitsanzeige verfügt, wird diese im mittleren Simulationsmonitor digital eingeblendet. Als Simulationssoftware kommt SILAB 3.0 vom Würzburger Institut für Verkehrswissenschaft (WIVW) zum Einsatz. Die Software bietet die Möglichkeit, reale Versuchsstrecken nachzubauen.

Bei den Feldversuchen kommt ein Honda Accord 2.4 (CL9) der siebten Modellgeneration (Erstzulassung im Jahr 2003) mit 5-Gang-Automatikgetriebe als Versuchsträger zum Einsatz (Abbildung 4.4, rechts). Es handelte sich um einen Vierzylinder Otto-Motor mit 140 kW (190 PS) und 223 km/h Höchstgeschwindigkeit. Der Versuchsträger ist mit einer Radarsensorik ausgestattet, die den Abstand und die Relativgeschwindigkeit gegenüber Objekten aufzeichnet. Weiterhin ist das Fahrzeug mit diverser Messtechnik ausgestattet, die überwiegend im Kofferraum verbaut ist. Ein Messrechner (Dewesoft Software) zeichnet die vom PCAN-Modul zur Verfügung gestellten Fahrzeugdaten, die Radardaten sowie die Daten der ADMA (Automotive Dynamic Motion Analyzer) auf. Zusätzlich werden zwei GPS-Empfangssysteme in die Datenaufzeichnung integriert, um die aktuelle Position des Fahrzeugs zu ermitteln. Eine Novotel Antenne wird dazu an der ADMA angeschlossen und ebenso am Kofferraumdeckel montiert wie ein einfacher Navilock GPS-Empfänger.

⁶ Als Sitzkiste wird eine Fahrzeugkarosserie mit intaktem Innenraum verstanden (Knappe 2009).

⁷ Technische Daten der Bewegungsplattform werden vom Hersteller leider nicht herausgegeben.



Abbildung 4.4: Dynamischer Fahrsimulator (links) und realer Versuchsträger Honda Accord 2.4 (rechts).

4.4 Datenerfassung

4.4.1 Expertenbefragung

Ziel des Untersuchungskonzepts ist es, möglichst viele Kennwerte unterschiedlicher Kategorien zu erheben. So ist eine umfassende Validitätsbetrachtung möglich. Aus einer Betrachtung der Literatur lässt sich jedoch keine konkrete Auswahl wesentlicher Validitätskennwerte treffen. Die bisher in den Studien berücksichtigten Kennwerte divergieren zum Teil stark, zudem finden manche Kennwert bislang kaum Berücksichtigung (Zöller et al., 2013). Um die für die Validitätsanalyse relevanten Kennwerte zu identifizieren, wurde daher eine Befragung von Experten aus Industrie und Forschung durchgeführt. Dabei handelt es sich um Personen, die selbst Forschungen an Fahrsimulatoren durchführen und daher über einen entsprechenden Erfahrungs- und Wissensschatz auf dem Gebiet verfügen. Die $N = 23$ Teilnehmer bekamen dafür einen Fragebogen zugesandt, der die in bisherigen Validierungsstudien ($N = 62$) berücksichtigten Kennwerte, klassifiziert nach den auf Brown (1975) zurückgehenden Kategorien (Fahr-dynamikkennwerte, Fahrerverhaltenskennwerte, physiologische und subjektive Kennwerte) enthielt. Abgefragt wurde die von den Experten eingestufte Relevanz dieser Kennwerte vor dem Hintergrund einer Validierung eines Fahrsimulators. Hierzu wurde eine getrennte Befragung für die Szenerien Stadt, Landstraße und Autobahn vorgenommen, um den Einfluss der Szenerie auf die Relevanzeinstufung herauszufinden.

Auf Basis der Experteneinstufungen wird eine Auswahl an Kennwerten getroffen. Als wichtigstes Kriterium wird festgelegt, dass aus allen vier Kategorien Kennwerte mit in die Erhebung einbezogen werden, um eine möglichst große Aussagekraft zu Validitätsaspekten unterschiedlicher Kategorien zu erzielen. Zudem wird bei den Fahr-dynamikkennwerten festgelegt, dass alle in beiden Untersuchungsumgebungen messbaren Kennwerte erhoben werden, da der Mehraufwand einzelner Kennwertberücksichtigungen hier minimal ist. Tabelle 4.4 zeigt alle Fahr-dynamikkennwerte mit der jeweiligen Anzahl absoluter Nennungen aggregiert für alle

drei Szenarien (die Maximalpunktzahl entspricht bei drei Szenarien und 23 Experten 69 Nennungen) sowie der Angabe, welche Kennwerte für die Validierungsstudie ausgewählt werden.

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Expertenbefragung im Bereich Fahrdynamikkennwerte (x = ausgewählt, o = nicht ausgewählt).

Fahrdynamikkennwerte	Anzahl absoluter Nennungen	Kennwert-Auswahl
Längsgeschwindigkeit	59	X
TTC	55	X
Abstand zum Vorfahrenden	47	X
Längsbeschleunigung	44	X
Laterale Position	43	X
Lenkradwinkel	36	X
TLC	34	X
Querbearbeitung	33	X
Gaspedalposition	29	X
Bremskraft/-druck	25	X
Gierrate	17	X
Bremspedalposition	15	X
Lenkradrückstellrate	11	X

Der Mehraufwand der Messung einzelner Kennwerte aus den anderen drei Kategorien ist jedoch erheblich. Daher wird hier auf weitere Auswahlkriterien zurückgegriffen. Im Bereich der Fahrerhaltenskennwerte und der physiologischen Kennwerte werden grundsätzlich jeweils die drei Kennwerte mit der höchsten Anzahl absoluter Nennungen ausgewählt (Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6). Bei den physiologischen Kennwerten erzielten mehrere Kennwerte die gleiche Anzahl an Nennungen (Herzschlagvariabilität, Muskelaktivität, Blutdruck). In diesem Fall wird die Herzschlagvariabilität ausgewählt, da sie über die gleichen Elektroden erfassbar ist wie die Herzschlagrate. Die Anbringung weiterer Elektroden und Messgeräte an die Probanden würde zu einem weiteren Zeitaufwand sowie zu einer erheblichen Bewegungseinschränkung der Probanden führen.

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Expertenbefragung im Bereich Fahrerhaltenskennwerte (x = ausgewählt, o = nicht ausgewählt).

Fahrerhaltenskennwerte	Anzahl absoluter Nennungen	Kennwert-Auswahl
Blickbewegung	57	X
Reaktionszeit	49	X
Bedientätigkeit von Instrumenten	40	X
Gleichmäßiges Lenkverhalten	28	0
Kopfbewegungen	28	0
Aufgabendauer einer pot. Nebenaufgabe	18	0
Reaktionszeit bis Beginn der pot. Nebenaufgabe	12	0

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Expertenbefragung im Bereich physiologischer Kennwerte (x = ausgewählt, o = nicht ausgewählt).

Physiologische Kennwerte	Anzahl absoluter Nennungen	Kennwert-Auswahl
Herzschlagrate	13	X
Hautleitwert/-widerstand	9	X
Herzschlagvariabilität	6	X
Muskelaktivität	6	0
Blutdruck	6	0
Atemfrequenz	2	0
Hauttemperatur	0	0

Tabelle 4.7: Ergebnisse der Expertenbefragung im Bereich subjektiver Kennwerte (x = ausgewählt, o = nicht ausgewählt).

Subjektive Kennwerte	Anzahl absoluter Nennungen	Kennwert-Auswahl
Workload (NASA-TLX)	54	0
Subj. Realitätsempfinden	44	X

Im subjektiven Bereich werden zwei Kennwerte in der Expertenbefragung aufgeführt; Tabelle 4.7 zeigt die Ergebnisse in diesem Bereich. Zur Messung der subjektiven Einschätzungen des aus einer Simulatorfahrt entstehenden Workloads bieten sich mehrere fundierte Fragebogenmethoden an: die „Cooper-Harper Scale“ (Cooper & Harper, 1969), die „Subjective Workload Assessment Technique“ (SWAT) (Reid & Nygren, 1988), die „Bedford Scale“ (Roscoe, 1987), oder der „National Aeronautics and Space Administration Task-Load Index“ (NASA-TLX) (Hart & Staveland, 1988). Der NASA-TLX wird trotz häufiger Nennungen nicht als Kennwert ausgewählt, da der mit dem Ausfüllen des Fragebogens verbundene Zeitaufwand (Miller, 2001) den ohnehin umfangreichen Versuchsplan deutlich ausgeweitet hätte und die Motivation der Probanden hätte gefährden können. Zudem finden sich in der Literatur weitere Kritikpunkte an der Methode NASA-TLX. So wird angemerkt, dass die den Fragebogen ausfüllenden Probanden über eine hohe Differentiationsfähigkeit zwischen den verschiedenen Beanspruchungen verfügen müssten, um aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen. Gemäß Rohmert (1994) ist diese Fähigkeit jedoch nicht immer vorhanden. Die größte Schwierigkeit einer Erfassung des Workload über Befragungen während Fahrversuchen besteht jedoch darin, dass die Beanspruchung in spezifischen Situationen mit hoher Komplexität (mehrspurige Kreuzungen) nur gemessen werden könnte, wenn der Versuch unterbrochen würde, um die Befragung direkt nach Durchfahren der Situation durchzuführen. Dies ist nicht gewünscht, da die Versuchsfahrt stockend ablaufen und dies die Beurteilung des Realitätsgrads der Fahrt hätte erschweren können. Zudem ziehen Unterbrechungen die Dauer der Versuchsfahrt in die Länge, was sich negativ auf die Motivation und Wachheit der Probanden auswirken könnte. Der Workload als interessanter Kennwert kann jedoch auch über andere Kennwertkategorien erfasst werden: über Leistungen in der primären und sekundären Fahraufgabe (Miller, 2001;

Rudin-Brown, Williamson & Lenné, 2009; Megaw, 2005) und über eine ansteigende physiologische Körperreaktion (Megaw, 2005). Im vorliegenden Versuch werden physiologische Kennwerte zur Workloaderfassung herangezogen, wodurch eine kontinuierliche Messwertfassung bei zugleich geringer Aufgabendurchführungsstörung möglich wird; dies wird als objektiv angesehen, da der Proband keinen Einfluss nehmen kann (Schlick et al., 2010).

Ein selbst entwickelter Fragebogen zum subjektiven Realitätsempfinden findet ebenfalls Anwendung. Er ist im Anhang einzusehen.

4.4.2 Definitionen und Aussagegehalt

Im Folgenden werden die im Rahmen der Expertenbefragung ausgewählten Kennwerte definiert und ihr Aussagegehalt näher erläutert.

Fahrdynamikkennwerte

Gemäß Reif & Dietsche (2007) zählen u. a. folgende Größen zur Bewertung der Fahrdynamik eines Fahrzeugs: Längs-/ Quergeschwindigkeit, Längs-/ Querbeschleunigung, Wank-/ Nick-/ Gierwinkel, Lenkradwinkel. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff der Fahrdynamikkennwerte etwas weiter gespannt und um die Gas- sowie Bremspedalposition ergänzt. Diese sind streng genommen keine direkten fahrdynamischen Größen, die Betätigung der Pedalerie durch den Fahrer wirkt jedoch auf die Fahrdynamikbewertungsgrößen ein. Tabelle 4.8 enthält wesentliche Informationen zu den einzelnen Fahrdynamikkennwerten.

Tabelle 4.8: Definitionen und wesentliche Informationen zu den betrachteten Fahrdynamikkennwerten.

Die **Längsgeschwindigkeit** ist ein geläufiges Maß für die pro Zeiteinheit zurückgelegte Wegstrecke. Sie beschreibt am besten die Kinematik der Fahrsituation (McLaughlin et al., 2009). Die simulierte Fahrzeuggeschwindigkeit gilt als die am häufigsten betrachtete abhängige Fahrzeugvariable in der Fahrsimulationsforschung (Rudin-Brown et al., 2009). Dies bestätigt auch die Literaturrecherche zu Validitätskennwerten (Zöller et al., 2013).

In Richtung der Fahrzeuglängsachse wirkende Antriebs- und Beschleunigungskräfte werden unter dem Begriff der **Längsbeschleunigung** zusammengefasst. Die Längsbeschleunigung ist bei gegebener Pedalierstellung zudem abhängig von der aktuellen Fahrbahnsteigung und vom Belag. Die negative Beschleunigung wird auch Verzögerung genannt und die Beschleunigung quer zur Fahrtrichtung **Querbeschleunigung**. Seitenwinde sowie Reifenkräfte beeinflussen diese Größe (Reif & Dietsche, 2007).

Der **Abstand zu einem Vorfahrenden** beschreibt die longitudinale Distanz (in Metern) zwischen dem vorderen Ende des Egofahrzeugs und dem hinteren Ende eines unmittelbar vorfahrenden Fahrzeugs. Ohne Angaben zu den jeweils gefahrenen Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge ist dieser Abstandskennwert jedoch von geringem Informationsgehalt (Rudin-Brown et al., 2009).

Die **time to collision (TTC)** nach Van der Horst & Godthelp (1989, zitiert nach Lange, 2008) gibt die Zeit (in Sekunden) an, bis zwei Verkehrsteilnehmer bei gleichbleibender Relativgeschwindigkeit und unverändertem Kurs kollidieren (Neimer & Mohellebi, 2009). Werte unter 1,5 s gelten gemäß Van der Horst & Godthelp (1989, zitiert nach Lange, 2008) als kritisch. Im Gegensatz zum Kennwert der Zeitlücke wird hier nicht die absolute, sondern die relative Geschwindigkeit des Egofahrzeugs gegenüber einem vorausfahrenden Fahrzeug in Bezug zum Abstand gesetzt (Filzek, 2002).

Während die TTC ein Zeitmaß der Längsführung darstellt, gibt es auch für die laterale Spurposition ein Zeitmaß. Die **time to line crossing (TLC)** stellt die Zeit bis zum Überfahren der Fahrstreifenmarkierung mit einem der Fahrzeugreifen dar, sofern Geschwindigkeit und Lenkradwinkel konstant gehalten werden (Östlund et al., 2006). Die TLC gilt als Maß für die Sicherheitsmarge der lateralen Kontrolle (Godthelp & Kornings, 1981, zitiert nach Östlund et al., 2006).

Ein fahrstreifenbasiertes Maß zur Beurteilung der Querführungsgüte ist die **laterale Spurposition**. Sie beschreibt den seitlichen Versatz zwischen dem Fahrzeug und einem Bezugspunkt (Rudin-Brown et al., 2009). Hierbei wird meist die Fahrstreifenmarkierung rechts/links (Blaauw, 1982) oder die Mitte des Fahrstreifens gewählt (Rudin-Brown et al., 2009). Neben dem Mittelwert gilt insbesondere die Standardabweichung als wichtiger Parameter, da mit ihr eine reduzierte laterale Kontrolle des Fahrzeugs in Zusammenhang steht (Östlund et al., 2005).

Der **Lenkradwinkel** beschreibt den Winkel des Lenkradeinschlags in Grad. Aufgrund der Trägheit des Fahrzeugs stellt der Lenkradwinkel ein hochfrequenteres Querführungsmaß als die Spurabweichung dar (Knappe, 2009).

Die **Lenkradrückstellrate**, ursprünglich auf McLean & Hoffman (1975) zurückzuführen, beschreibt die Anzahl an Lenkradrichtungswechseln pro Minute (Östlund et al., 2006). Hierbei gilt beispielsweise eine Winkel­differenz von ca. 2° beim Lenken als ausschlaggebend. Gegenüber dem Kennwert der Lenkradwinkelvariation bietet sich hier der Vorteil, dass kleine Lenkkorrekturen nicht berücksichtigt werden (Östlund et al., 2006).

Die **Gaspedalposition** bezeichnet den Anteil, zu dem ein Gaspedal, gemessen am maximalen Pedalweg, durchgedrückt wird (Reed & Green, 1995). Es ist ein Maß, welches einen Hinweis über eine beabsichtigte Geschwindigkeitsbeibehaltung oder -änderung gibt (Rudin-Brown et al., 2009). Die **Bremspedalposition** definiert sich analog.

Bremskraft bzw. -druck beschreibt die Kraft- bzw. Druckaufwendung des Probanden auf das Bremspedal während eines Bremsmanövers (Rudin-Brown et al., 2009).

Die **Gierrate** (auch Giergeschwindigkeit) bezeichnet die Drehgeschwindigkeit des Fahrzeugs um die Hochachse (Schmidt & Winner, 2007).

Fahrerverhaltenskennwerte

Tabelle 4.9 enthält die wesentlichen Informationen zu den Fahrerverhaltenskennwerten Blickbewegung, Reaktionszeit und Bedientätigkeit von Instrumenten.

Tabelle 4.9: Definitionen und wesentliche Informationen zu den betrachteten Fahrerverhaltenskennwerten.

Das **Blickbewegungsverhalten** eines Fahrers liefert einen hohen Informationsgehalt über dessen Aufmerksamkeitsbereiche (Wickens & Hollands, 2000; Schlick et al., 2010). Gängige Parameter sind die Fixationsdauer und -häufigkeit (Abendroth, Bruder, Fuchs & Schramm, 2009). Die Fixationsdauer beschreibt die zeitliche Dauer der Fixation eines ausgewählten Interessensbereichs (Area of Interest, AOI). Die Fixationshäufigkeit hingegen gibt die Anzahl der Fixationen auf ein ausgewähltes AOI wieder.

Die **Reaktionszeit** ist definiert als die Zeitspanne zwischen einem Ereignis in Fahrumgebung und der darauf ausgerichteten Reaktion des Fahrers (Neimer & Mohellebi, 2009). Es lassen sich verschiedene Reaktionszeiten wie die Wahrnehmungsreaktionszeit oder die Bremsreaktionszeit unterscheiden.

Die **Bedientätigkeit von Instrumenten** umfasst alle Einstelltätigkeiten des Fahrers, die nicht der primären Fahraufgabe dienen. Hierunter fallen beispielsweise die Betätigung von Blinker und Scheibenwischanlage sowie die Einstellung von Navigationsgeräten oder Radio.

Physiologische Kennwerte

Physiologische Kennwerte liefern Hinweise auf die Beanspruchung („Workload“) eines Probanden. Auch für die Fahrzeugführung gilt diese Bedeutung als anerkannt (Fu et al., 2011). Eine Änderung der Beanspruchung zeigt sich als zeitlich begrenzte Veränderung der gemessenen Daten. Der Fokus der Versuchsreihe liegt auf der Erhebung der psychischen (mental) und emotionalen Beanspruchung; zu diesem Zweck enthält Tabelle 4.10 die wesentlichen Informationen zu diesen Kennwerten.

Tabelle 4.10: Definitionen und wesentliche Informationen zu den betrachteten physiologischen Kennwerten.

Die **Herzschlagrate** (kurz: HR, Synonym: **Herzfrequenz**) kann als ein Maß für mentale und emotionale Beanspruchung gesehen werden (Breuer, 1996) und beschreibt die Schläge des Herzens pro Minute (beats per minute, bpm) (Schandry, 2011). Sie berechnet sich aus dem EKG-Signal als Kehrwert des R-Zacken-Abstands und somit des Abstands zwischen zwei Kontraktionen der linken Herzkammer (Rohmert, 1994; Schlick et al., 2010). Gängige Werte für die HR liegen im Bereich von 60-70 Schlägen pro Minute in der Ruhephase; der noch im Normalniveau befindliche Wertebereich erstreckt sich gemäß Fröscher (2011) zwischen 40 und 200 Schlägen die Minute. Bei einer Belastung zeigt sich meist innerhalb von 4 Sekunden ein Anstieg der Herzschlagrate, die nach Ende der Belastung deutlich träger abfällt und sich nach ca. 1-1,5 Minuten wieder auf das Ausgangsniveau einpendelt (Tomasits & Haber, 2011). Da die Herzschlagrate auch auf einen Anstieg des physischen Workloads positiv reagiert (Jorna, 1993), muss sichergestellt sein, dass die physische Arbeit begrenzt ist. Im Rahmen von Fahrversuchen ist die Bestimmung der Herzschlagrate zur Beanspruchungsmessung eine klassische Methode (Hering, 1999); dies liegt an der einfachen Elektrodenanbringung und der geringen Anfälligkeit gegenüber Artefakten (Bouscein & Backs, 2000). Artefakte können beispielsweise aus einer zu locker oder zu fest sitzenden Elektrode sowie auch aus Bewegungen und tiefen Atemzügen des Probanden hervorgerufen werden und sind entsprechend durch eine saubere Versuchsvorbereitung und Anweisungen an den Probanden zu vermeiden.

Auch die **Herzschlagvariabilität** (kurz: HRV) stellt einen physiologischen Kennwert für mentale Beanspruchung dar (Luczak & Laurig, 1973; Fu et al., 2011); das EKG-Signal dient wiederum als Rohsignal. Sie gilt als besonders sensitiv gegenüber leichten Änderungen im Workload (Fu et al., 2011). Das Maß erfasst Änderungen der Herzschlagrate (Schwankungen) über die Zeit (Miller, 2001; Rohmert, 1994). Änderungen innerhalb der Herzschlagrate können durch körperliche Aktivität sowie durch emotionale Regungen (sympathische Nervenbahn aktiv), aber auch durch Ruhephasen (parasympathische Nervenbahn aktiv) beeinflusst werden (Pfister et al., 2001). Schwankungen der HR liegen bei einem gesunden Menschen in der Regel im Bereich von 15 Schlägen pro Minute, wohingegen Schwankungswerte unter 10 Schlägen die Minute als krankhaft oder ungesund zu interpretieren sind (Löllgen, 1999). Die Variabilität sinkt dabei mit zunehmender mentaler Beanspruchung (Mulder & Mulder, 1981; Faber, 1979; Fu et al., 2011) bzw. mit steigender Herzschlagfrequenz (Faber, 1979; Rohmert, 1994).

Neben der kardiovaskulären Aktivität ist die elektrodermale Aktivität (kurz EDA) ein weiterer Indikator zur Messung psychischer Beanspruchung (Boucsein, 2012). Man unterscheidet tonische Anteile des EDA-Signals (skin conductance level, SCL), die das Grundniveau sowie Änderungen über längere Zeit wiedergeben, und phasische Signalanteile (skin conductance response, SCR), die als konkrete Reaktion auf einen Einzelreiz entstehen (Bruns & Praun, 2002). Ein gängiger Kennwert für emotionale Beanspruchung ist in diesem Zusammenhang der **Hautleitwert (kurz: HLW)** (u. a. Breuer, 1996). Diese Hautleitfähigkeit (auch Skin Conductance, SC, genannt) ist der Kehrwert des Hautwiderstands (auch Skin Resistance, SR, genannt) (Boucsein, 1988) und gibt die Fähigkeit der Haut wieder, elektrischen Strom zu leiten (Östlund et al., 2006). Dabei wird bei der SC-Messung die angelegte Spannung und bei der SR-Messung der angelegte Stromfluss konstant gehalten (Boucsein, 1988). Die Verwendung der Hautleitfähigkeit hat sich aus Berechnungsvorteilen in der Praxis durchgesetzt (Bruns & Praun, 2002). Gängige Werte des HLW liegen zwischen 1-10 μS , wobei der Maximalbereich von 0 bis 50 μS geht (Mantsch, o. J.). Ein Vorteil der EDA-Messung kann in der gegenüber anderen körperlichen Parametern schnelleren und deutlicheren Reaktion auf kurzfristige Beanspruchungen gesehen werden (Küting, 1976; Bruns & Praun, 2002). EDA-Maße zeigen jedoch eine verstärkte Anfälligkeit für Artefakte gegenüber der HSF (Boucsein, 2012). Um eine möglichst artefaktfreie Erhebung des EDA-Wertes zu gewährleisten, ist eine Ruhelage des Körperteils anzustreben, an dem die ableitenden Elektroden befestigt sind.

Subjektive Kennwerte

Neben objektiven Kennwerten können auch subjektive Daten wichtige Informationen zur Validität eines Fahrsimulators liefern. So ermöglicht der subjektiv von den Probanden empfundene Realitätsgrad eine Einschätzung darüber, wie realistisch die Probanden die Simulatorfahrt empfanden (Blaauw, 1982). Ein gering eingestufte Realitätsgrad kann bspw. als Indiz für ein realitätsfernes und somit nicht valides Fahrerverhalten bzw. Fahrerbeanspruchung angesehen werden, da dem Probanden die Fahrt nicht real und somit ggf. auch nicht risikobehaftet vorkommt.

4.4.3 Messmethoden

Nachdem die wichtigsten Kennwerte vorgestellt wurden, wird ein Einblick in deren jeweilige Messmethode gegeben.

Fahrdynamikkennwerte

Grundlegendes Ziel bei der Datenaufzeichnung ist es, die größte Schnittmenge zwischen den Ergebnissen der Expertenbefragung und den in beiden Untersuchungsumgebungen aufzeichnenbaren und vergleichbaren Kennwerten zu erheben. Da das Ziel bei der Kategorie der fahrdynamischen Kennwerte darin besteht, alle möglichen Kennwerte aufzuzeichnen, ergibt sich die in Abbildung 4.5 veranschaulichte Schnittmenge.

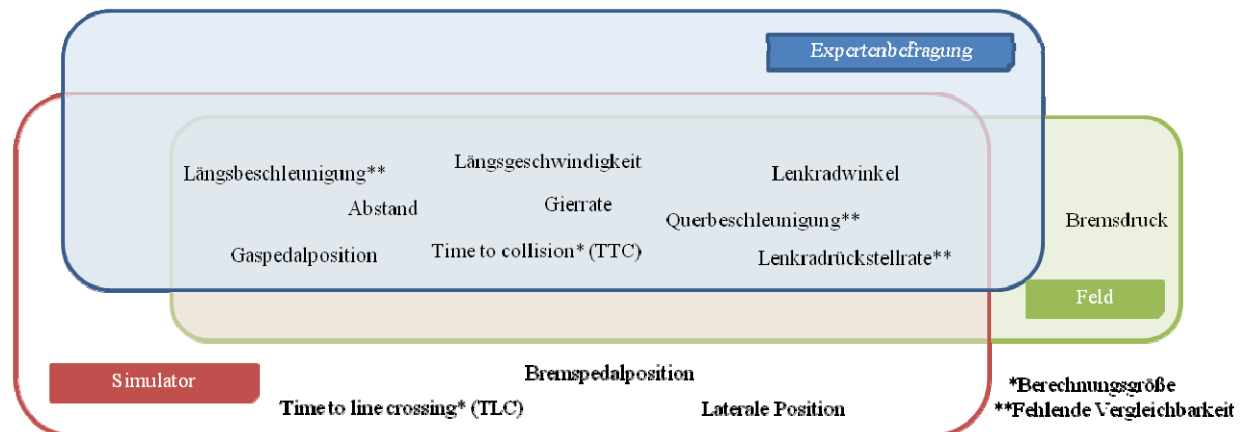


Abbildung 4.5: Schnittmenge zwischen der Expertenbefragung sowie den in realer und simulierter Umgebung erfassbaren Fahrdynamikkennwerten.

Der Großteil der Kennwerte lässt sich in Feld und Simulator aufzeichnen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird bei einigen Größen eine Normierung vorgenommen. Die TTC ist eine Berechnungsgröße, die sich für beide Untersuchungsumgebungen bestimmen lässt. Im Feldversuch ergibt sich jedoch bei zwei Querführungsgrößen das Problem fehlender Sensoren. So können die laterale Position und die TLC nur im Simulator aufgezeichnet werden. Bei der Längs- und Querbeschleunigung sowie bei der Lenkradrückstellrate ist das Problem nicht vergleichbarer Fahrzeugmodelle bzw. Lenkungsparameter zu beachten, da SILAB einen 5er BMW modelliert und der Feldversuch mit einem Honda Accord gefahren wurde. Entsprechend werden diese Größen aus der statistischen Berechnung und somit der Validitätsanalyse herausgelassen. Eine weitere Differenz, die sich in einer fehlenden Vergleichbarkeit ausdrückt, entsteht aufgrund der unterschiedlichen Messmöglichkeiten der Bremspedalkennwerte in beiden Umgebungen. Während der Simulator mit einem Winkelgeber versehen ist und so die Bremspedalposition misst, kann im Fahrzeug über den CAN-Bus (Controller Area Network – Binary Unit System) nur auf den Bremsdruck zugegriffen werden. Beide Größen fallen daher aus der weiteren Betrachtung heraus.

Tabelle 4.11 liefert schließlich einen Überblick darüber, welche Messsysteme zur Erfassung welcher Daten im Fahrsimulator und im Realfahrzeug zum Einsatz kommen.

Tabelle 4.11: Bezeichnung, Einheit und Aufzeichnungsrate der Messsysteme in Feld und Simulator.

Signal / Kennwert	Messsystem Fahr- simulator	[Einheit], Aufzeichnungsrate Fahr Simulator	Messsystem Realfahrzeug	[Einheit], Aufzeichnungsrate Realfahrzeug
Längsgeschwindigkeit (Tachometer-Anzeige)	SILAB	[m/s], 60 Hz	CAN-Bus	[km/h], 100 Hz
Lenkradwinkel	SILAB	[rad], 60 Hz	CAN-Bus	[°], 50 Hz
Gaspedalstellung	SILAB	normiert [-], 60 Hz	CAN-Bus	Normiert [-], 100 Hz
Abstand zum Zielfahrzeug	SILAB	[m], 60 Hz	Radar	[m], 10-12 Hz
Geschwindigkeit Zielfahrzeug	SILAB	[m/s], 60 Hz	-	-
Relative Geschwindigkeit zum Zielfahrzeug	Berechnung	[s]	Radar	[m/s], 10-12Hz
TTC zu Zielfahrzeug	Berechnung	[s]	Radar	[s], 50 Hz
Zeitlücke zu Zielfahrzeug	Berechnung	[s]	Berechnung	[s]
Gierrate	SILAB	[rad/s], 60 Hz	ADMA	[°], 100 Hz
Position auf Strecke	SILAB	[-], 60 Hz	GPS-Empfänger	[Dezimalsekunden], 5 Hz

Im Fahrsimulator stellt die Simulationssoftware SILAB eine DPU (DataProcessingUnit) zur Verfügung, mit der Kennwerte der Längs- und Querführung mit einer Rate von 60 Hz aufgezeichnet werden können. Im Feldversuch können die fahrzeugbezogenen Größen aus dem CAN-Bus ausgelesen werden. Ein Messrechner, ausgestattet mit der Software DEWESoft, verknüpft hierfür Signale aus dem CAN-Bus, der Radarsensorik, der ADMA (Automotive Dynamic Motion Analyzer) sowie dem GPS-Empfänger.

Im Gegensatz zu den fahrdynamischen Kennwerten ist die Erhebung der anderen Kennwerte wie der Blickbewegung oder der physiologischen Kennwerte über externe Messgeräte möglich. Entsprechend ergeben sich analoge Aufzeichnungsmöglichkeiten für Feld und Simulator. Im Folgenden werden daher Messsysteme vorgestellt, die in beiden Umgebungen Anwendung finden.

Fahrerverhaltenskennwerte

Mit Hilfe verschiedener Kameraperspektiven wird der Fahrer in seinem Verhalten beobachtet und dieses dokumentiert. Zur zeitsynchronen Erfassung verschiedener Kamerasysteme (Aufzeichnungsrate 25 Hz) kommt ein Multiplexer zum Einsatz, der das von einem Videograbber digitalisierte Signal empfängt und die einzelnen Kamerabilder in eine Videodatei zusammenfügt. Aufgezeichnet wird die Bedientätigkeit von Instrumenten. Zusätzlich ist eine Kamera für die Erfassung der Fahrumgebung aus Fahrersicht sowie die Dokumentation des Synchronisierungsevents zuständig, auf das an späterer Stelle noch eingegangen wird.

Die Blickbewegung der Probanden wird mittels eines helmbasierten Eye-Tracking-Systems iView X der Firma SMI aufgezeichnet (Abbildung 4.6). Dabei werden die Messdaten mit einer Frequenz von 50 Hz aufgezeichnet, in den Videos jedoch nur mit 25 Hz protokolliert. Das System basiert auf der Corneareflexion Infrarotokularografie. Bei dieser Methode wird die Augenbewegung anhand der Verschiebung des Cornea-Reflexes auf der Hornhaut berechnet (Woyna, 2014). Die Position des Reflexes ist relativ zur Pupille augenstellungsgebunden (Schlick et al., 2010). Anhand der Positionsrelation während der Kalibration wird die aktuelle Position des Fixationspunktes auf das Umgebungsvideo bezogen. So kann das System bei der späteren Versuchsfahrt die aktuelle Blickrichtung des Probanden qualitativ im Umgebungsvideo darstellen. Zur Realisierung einer hohen Aufzeichnungsgüte ist eine 5-Punkt-Kalibration des Systems im Vorfeld der Versuchsfahrt nötig.



Abbildung 4.6: Eye-Tracking-Messsystem.

Physiologische Kennwerte

Kennwerte der Fahrerbeanspruchung werden mit dem physiologischen Messsystem Varioport der Firma Becker Meditec aufgezeichnet. Das Gerät ermöglicht die Aufzeichnung des EKG-Rohsignals, aus dem sich die Herzschlagfrequenz und die Herzschlagvariabilität ableiten lassen, sowie des EDA-Signals. Wichtige Angaben zu den Messdaten finden sich in Tabelle 4.12.

Tabelle 4.12: Technische Angaben der Messdaten des Varioport (entnommen aus dem Varioport Handbuch).

Kennwert	Einheit	Wertebereich	Auflösung	Scanrate	Speicherrate
EKG	mV	±5,4 mV	0,002 mV	512 Hz	256 Hz
EDA	µS	0-50 µS	0,002 µS	64 Hz	32 Hz

Zur EKG-Datenerfassung kommen drei Einwegelektroden zum Einsatz, die gemäß Abbildung 4.7 im Brustbereich angelegt werden. Im Bereich arbeitswissenschaftlicher Untersuchungen sind drei Elektroden für die MC₅-Ableitung (zw. Medioclavicular und dem fünften linken Intercostalraum) ausreichend (Schlick et al., 2010). Die Messung des EDA-Signals bzw. der

Hautleitfähigkeit erfolgt exosomatisch über zwei Mehrwegelektroden (Elektrodenpaste mit 0,5% NaCL) an der Fußinnenseite des linken Fußes (Abbildung 4.7), da sowohl der Simulator als auch der reale Versuchsträger mit einem Automatikgetriebe ausgestattet sind und der Fuß daher nicht in Bewegung ist. Faber (1979) listet verschiedene Ableitorte für den Hautleitwert auf und ordnet der Fußinnensohlennische Innenseite den zweiten Rang hinsichtlich einer kombinierten Betrachtung der Auswertbarkeit und Empfindlichkeit zu.



Abbildung 4.7: Ableitorte des EKG (rechts) und des EDA (links).

Subjektive Kennwerte

Im Rahmen der Fahrversuche kommen Fragebögen zum Einsatz, um wichtige probandenbezogene Daten sowie insbesondere ihre subjektiven Einschätzungen zu erheben. Der eigens dafür konzipierte Fragebogenkatalog setzt sich aus drei unterschiedlichen inhaltlichen Abschnitten zusammen und kann im Anhang eingesehen werden. Dabei werden Fragebogen A und B nur einmal zu Beginn der Versuchsreihe vom Probanden ausgefüllt, während Fragebogen C nach jeder der vier Simulatorfahrten zum Einsatz kommt, um den jeweils empfundenen Realitätsgrad abzufragen.

Fragebogen A bezieht sich auf allgemeine Angaben zur Person wie Alter, Geschlecht, Fahrertyp. Ziel ist es, mögliche Zusammenhänge zwischen Personenmerkmalen (Leistungsvoraussetzungen) und den erhobenen Kennwerten (Bewältigung/ Wirkung) zu identifizieren oder auszuschließen. Die Fahrertypen sind entnommen aus Abendroth & Bruder (2009).

Der zweite Abschnitt der Befragung, **Fragebogen B**, befasst sich mit der persönlichen Erfahrung (Leistungsvoraussetzung) der Versuchsteilnehmer bzgl. verschiedener themenbezogener Erlebnisse und deren aktuellem Befinden.

Nach den Versuchsfahrten im Fahrsimulator wird der Proband gebeten, **Fragebogen C** auszufüllen. Ziel dieses Fragenkomplexes ist es, den Eindruck hinsichtlich des Realitätsgrads des Fahrsimulators zu ermitteln und so einen wichtigen subjektiven Kennwert zur Validierung von Simulatorfahrten zu gewinnen. Es wird überprüft, inwiefern einzelne Gestaltungsparameter eines Fahrsimulators einen Einfluss auf die Akzeptanz bzw. den Realitätsgrad haben. Der Fragebogen ist in fünf thematische Abschnitte unterteilt: (1) Allgemeines, (2) Fahrdynamik,

(3) Haptik/ Akustik, (4) Sichtsimulation und (5) Bewegungssimulation. Dabei werden die Probanden nach einer Einstufung des Realitätsgrads der Fahrsimulatorfahrt gefragt, indem sie die abgefragten Aspekte in Bezug zu einer normalen Autofahrt im eigenen Realfahrzeug auf öffentlicher Straße setzen. Die Probanden sollen die jeweiligen abgefragten Aspekte im Hinblick auf einen Vergleich zwischen dem im Fahrsimulator erlebten Realitätsgrad und einer Referenzfahrt im normalen Fahrzeug auf öffentlicher Straße beurteilen.

4.5 Zeitsynchronisierung, Aufbereitung und Auswertung der Daten

Zeitsynchronisierung

Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, kommen in der Versuchsreihe im Feld und im Simulator verschiedene Messsysteme zum Einsatz, um die einzelnen Validierungskennwerte aufzuzeichnen. Ein erster entscheidender Schritt bei der Datenaufbereitung ist daher die Zeitsynchronisierung der verschiedenen Systeme untereinander, um die einzelnen Daten zueinander in Bezug setzen zu können. Während der Datenaufzeichnung wird daher bereits ein Event (Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers) integriert, welches es im Nachhinein ermöglicht, einen einheitlichen Zeitstempel, die sog. Mainclock, einzuführen.

Szenarienidentifikation

In einem zweiten Schritt werden die Szenarien identifiziert. In der Stadt dienen hierzu im Feld wie auch im Fahrsimulator GPS-Referenzkoordinaten, die jeweils die Szenarien Abbiegevorgänge und Ohne Richtungsänderung kenntlich machen. Dabei werden kleinste Abstandskvadrat zwischen den GPS-Referenzkoordinaten und dem GPS-Messwert ermittelt und so der Zeitpunkt des Überfahrens einer Szenariengrenze identifiziert. Die Einteilung der Autobahn und Landstraße in Freie Fahrt bzw. Folgefahrt erfolgt hingegen anhand der Zeitlücke und somit mittels Simulator- bzw. Radardaten.

Datenaufbereitung

Nachdem die Szenarienidentifikation vollzogen ist, findet in einem nächsten Schritt die eigentliche Datenaufbereitung statt. Hierbei kann es sich entweder um eine Bereinigung von Datensätzen aufgrund von unplausiblen oder verfälschenden Werten / Verläufen oder um eine Anpassung der Datensätze aufgrund von Fehlern / Ungenauigkeiten in Messsystemen bzw. der Simulationssoftware bzw. aufgrund von Differenzen zwischen den Messsystemen im Feld und im Simulator handeln.

Datenauswertung

Die Auswertung der einzelnen Datensätze erfolgt für die reale und simulierte Untersuchungsumgebung weitestgehend identisch.

Die **fahrzeugbezogenen** Daten werden mit einem jeweils für die Untersuchungsumgebung spezifisch programmierten Matlab-Skript ausgewertet. Das Ergebnis der Auswerteskripte ist die Ausgabe ausgewählter statistischer Größen für die einzelnen Kennwerte: Mittelwert, Maximum, Minimum, Standardabweichung und 95stes Perzentil je Proband. Die für die Hypothesenüberprüfung benötigten Größen werden anschließend in eine Maske im Programm SPSS Statistics 20 (Fa. IBM) eingetragen, die die Ergebnisse beider Versuchsreihen vereint und als Basis für die statistische Überprüfung der Hypothesen dient.

Die Auswertung der **Blickbewegungsdaten** erfolgt mit einem speziell dafür vorgesehenen Programm BeGaze der Firma SMI. Im Rahmen der Versuche werden die relative Fixationshäufigkeit und –dauer als die prozentuale Häufigkeit bzw. Dauer von Fixationen auf ausgewählte Areas of Interest⁸ (AOI) im Verhältnis zur gesamten Fahrlänge ausgewertet. Es werden sieben AOIs definiert, die teilweise im Feldversuch weitere Objekte enthalten als in der Simulation (Tabelle 4.13).

Tabelle 4.13: Übersicht über die berücksichtigten Areas of Interests (AOI) und ihre Objektzugehörigkeit.

AOI-Bezeichnung	Integrierte Objekte	Spezifische Objekte im Feldversuch
Tacho	Digitale Geschwindigkeitsanzeige im Head-up Display (Sim), analoge Geschwindigkeitsanzeige im Kombi-Instrument (Feld)	
Ampel/ Schild	Verkehrsschild, Ampel	Säulenblitzgerät, Notrufsäule, Warnbake, Leitkegel
Gegenverkehr	Fahrzeuge, die entgegenkommen und am Verkehrsgeschehen unmittelbar beteiligt sind	
Verkehr	Fahrzeuge, die in gleiche Richtung fahren oder kreuzen und am Verkehrsgeschehen unmittelbar beteiligt sind	
Straße	Fahrbahn, Fahrstreifenmarkierung, Verkehrssymbole auf der Fahrbahn	
Umgebung	Parkende Fahrzeuge, Häuser, Bäume, Bürgersteige, Himmel, Wiese	Werbeschilder
(Sonstiges)	(Armbanduhr, Kamera, etc.)	(Fußgänger/ Fahrradfahrer, Außen-/ Innenspiegel, Fahrzeuginnenraum, Sonnenblende)

Nach der Zuordnung der Fixationen auf die AOI werden die Ergebnisse zur relativen Fixationshäufigkeit und -dauer exportiert und für die weitere Bearbeitung ebenfalls in die SPSS-Maske integriert. Aufgrund der geringen Vergleichbarkeit des AOI „Sonstiges“ in Feld und

⁸ Gemäß DIN 15007-1 (2000) beschreibt ein Interessensgebiet, AOI, einen definierten Bereich innerhalb der visuellen Szenerie.

Fahrsimulator, die auf die unterschiedlichen vorhandenen Objekte in beiden Untersuchungsumgebungen zurückzuführen ist, wird dieser Interessensbereich in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

Neben der Blickbewegung wird die **Bedientätigkeit von Instrumenten** als weiterer fahrer-verhaltensbezogener Kennwert aufgezeichnet. Bezüglich einer vergleichenden Auswertung zwischen beiden Untersuchungsumgebungen ergibt sich jedoch das Problem der teilweise nicht vorhandenen Bedieninstrumente im Fahrsimulator. So verfügt das Mockup nicht über Blinkerhebel, Scheibenwischer oder ein Multimediagerät. Aufgrund dieser fehlenden Vergleichbarkeit wird der Kennwert nicht weiter betrachtet.

Die **physiologischen Daten** bedürfen einer differenzierteren Auswertung. Während die Herzschlagrate und deren Variabilität für alle Szenarien mittels identischer Kennwerte ausgewertet werden, erfolgt beim Hautleitwert eine szenarienspezifische Analyse. Für Autobahn und Landstraße erfolgt eine Betrachtung der tonischen Hautleitfähigkeit (SCL), da hier aufgrund der geringen Komplexität maximal eine langfristige Änderung des Beanspruchungsniveaus zu erwarten ist. Für die innerstädtische Szenerie, die eine deutlich höhere Komplexität aufweist und spontane, kurzfristige Beanspruchungsniveaustiege erwarten lässt, wird die phasische Hautleitfähigkeit mit Hilfe der SCR-Amplitude analysiert. Neben diesen unterschiedlichen Kennwerten werden zudem unterschiedliche Datensegmente je Szenerie in die Auswertung einbezogen, um wiederum der unterschiedlichen Komplexität der Szenarien Rechnung zu tragen. Bei den betrachteten Landstraßen- und Autobahnabschnitten handelt es sich gemäß der Komplexitätsklassifizierung von Fastenmeier (1995) um Abschnitte niedriger Komplexität. Aufgrund dieser Einstufung ist mit keinen erhöhten Beanspruchungen der Probanden zu rechnen, weshalb eine Betrachtung der kompletten Szenerie durchgeführt wird und keine einzelnen Situationen herausgegriffen und gesondert behandelt werden. Im Stadtabschnitt liegt eine erhöhte Anzahl an komplex einzustufenden Situationen vor; dies sind in erster Linie Kreuzungsbereiche. Gemäß Fastenmeier (1995) handelt es sich bei einer innerstädtischen Kreuzung mit Wechsellichtzeichenanlage um eine Situation mittlerer Komplexität. Kreuzungen im innerstädtischen Bereich, die mittels Beschilderungen und Wartepflicht für den Fahrer geregelt sind, gelten hingegen als Situation hoher Komplexität. Da aufgrund dieser Klassifizierung mit deutlichen Anstiegen in den physiologischen Daten zu rechnen ist, findet für die Stadt eine situationsspezifische Auswertung statt. Hierzu werden sechs Kreuzungssituationen aus der Stadtstrecke ausgewählt, die als besonders interessant eingestuft werden (Abbildung 4.8). Dabei werden stets eine Minute vor bis eine Minute nach der Situation in die Betrachtung einbezogen, um die komplette Auswirkung der Situation auf den Fahrer zu erfassen. Einzig für die phasische SCR-Amplitude wird die komplette Stadtfahrt softwarebasiert ausgewertet und nicht nur die Auswahl der Kreuzungen. So können alle ggf. relevanten Passagen der

Stadtfahrt, die zu einer Reizreaktion des Probanden führen, Berücksichtigung finden. Bereits durch die Kennwertwahl der SCR-Amplitude als gängigstes Maß des phasischen Hautleitwerts wird der wichtigen Betrachtung Rechnung getragen, dass nur Situationen detektiert werden, in denen wirklich eine Signalreaktion stattgefunden hat.



Abbildung 4.8: Auswahl der sechs zu betrachtenden komplexen Kreuzungssituationen (rot: Auswahl anhand der Komplexitätseinstufung von Fastenmeier (1995), gelb: Auswahl anhand einer optischen Sichtung der Kreuzungskomplexität).

Im Vorfeld der Kennwertbildung und Datenauswertung physiologischer Signale ist noch eine Betrachtung des Einflusses der Szeneriereihenfolge auf die physiologischen Messsignale und somit die Probandenbeanspruchung notwendig. So wird vermutet, dass die Reihenfolge der zu absolvierenden Szenerien einen Einfluss auf das Beanspruchungsniveau der Probanden haben kann, da die Szenerien die angesprochenen unterschiedlichen Komplexitäten aufweisen. Zudem kann sich eine anfängliche Nervosität der Probanden ebenso auf die erste befahrene Szenerie auswirken wie eine ggf. abnehmende Anspannung zum Ende der Versuchsfahrt die letzte befahrene Szenerie beeinflussen kann. Entsprechend findet ein Pretest des Einflusses der Szeneriereihenfolge auf die Höhe der Beanspruchung statt. Die untersuchten Hypothesen werden am Beispiel der Herzschlagrate auf der Autobahnfahrt vorgestellt:

Es lässt sich kein signifikanter Einfluss der Szenerieposition der Autobahnfahrt auf den physiologischen Kennwert der Herzschlagrate detektieren.

Die Hypothesenbildung für die Kennwerte Herzschlagvariabilität und Hautleitwert gestaltet sich analog. Mithilfe einer Varianzanalyse bzw. eines Kruskal-Wallis Tests kann gezeigt werden, dass nahezu für keine Szenerie ein Reihenfolgeeinfluss auf die physiologischen Kennwerte nachgewiesen wird. Die Nullhypothese lässt sich auf einem Signifikanzniveau von 5% für 59 von 60 aufgestellten Hypothesen nicht verwerfen. Entsprechend findet im Weiteren keine Berücksichtigung der Szeneriereihenfolge statt. Die Signifikanzen können Tabelle 4.14 entnommen werden.

Tabelle 4.14: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss der Szeneriereihenfolge.

Untersuchungs- umgebung	Szenerie	ARHR	SCL / SCR- Amplitude	pNN50	rMSSD
Feld	Autobahn	p = 0,582	p = 0,169	p = 0,703	p = 0,680
	Landstraße	p = 0,084	p = 0,703	p = 0,715	p = 0,594
	Stadt	p = 0,955	p = 0,564	p = 0,477	p = 0,292
Parameterset 1	Autobahn	p = 0,432	p = 0,996	p = 0,245	p = 0,711
	Landstraße	p = 0,994	p = 0,867	p = 0,243	p = 0,256
	Stadt	p = 0,871	p = 0,941	p = 0,880	p = 0,977
Parameterset 2	Autobahn	p = 0,154	p = 0,448	p = 0,312	p = 0,579
	Landstraße	p = 0,221	p = 0,036	p = 0,200	p = 0,251
	Stadt	p = 0,397	p = 0,557	p = 0,192	p = 0,430
Parameterset 3	Autobahn	p = 0,754	p = 0,297	p = 0,091	p = 0,074
	Landstraße	p = 0,773	p = 0,217	p = 0,573	p = 0,802
	Stadt	p = 0,065	p = 0,395	p = 0,311	p = 0,312
Parameterset 4	Autobahn	p = 0,921	p = 0,575	p = 0,117	p = 0,074
	Landstraße	p = 0,967	p = 0,253	p = 0,682	p = 0,447
	Stadt	p = 0,062	p = 0,790	p = 0,275	p = 0,181

Nach der Überprüfung des Einflusses der Szeneriereihenfolge schließt sich die Kennwertbildung an. Um inter- und intraindividuelle Einflüsse auf die Messdaten auszuschließen und die Daten vergleichbar zu machen, werden physiologische Daten zunächst normiert (Breuer, 1996; Giakoumis, Tzovaras & Hassapis, 2013). Hierfür wird ein entsprechender Referenzwert für die Excel-basiert auszuwertenden Kennwerte des tonischen Hautleitwerts sowie der Herzschlagrate gebildet. Die anderen physiologischen Kennwerte der SCR-Amplitude und der Herzschlagvariabilität betrachten eine relative Änderung, sodass hier keine Normierung notwendig ist.

Für den Zweck der Normierung und entsprechenden Referenzwertfindung wird eine sog. „Baseline“-Messung durchgeführt. Hierzu wird für jeden Probanden in einem Zeitfenster von 2 Minuten nach der Versuchsfahrt ein Basisverlauf aufgezeichnet. Die Wahl dieser Periodenlänge lehnt sich an in der Literatur gefundenen Werten an (Giakoumis et al., 2013). Während dieser Phase füllen die Probanden, im Fahrsimulator sitzend, den Fragebogen aus, sodass standardisierte Bedingungen über alle Probanden herrschen. Es zeigt sich jedoch, dass die Probanden in dieser Baseline-Messung nicht unbedingt die niedrigste Beanspruchung aufweisen, weshalb diese Messdaten als unbrauchbar eingestuft werden. Zudem handelt es sich beim Ausfüllen eines Fragebogens nicht um die Grundbeanspruchung, die während einer Fahrzeugführungsaufgabe besteht.

Alternativ zu einer Referenzwertmessung in einer Ruhephase nennen Rohmert, Laurig & Jenik (1974) den Rückgriff auf das niedrigste Messwertniveau während der Versuchsfahrt als

weitere Möglichkeit. Das niedrigste Messwertniveau ist im konkreten Versuch auf der Landstraße zu erwarten, da diese Szenerie die geringste Komplexität aufweist. Die alleinige Verwendung des absoluten Minimalwertes innerhalb dieser Szenerie erweist sich jedoch nicht als empfehlenswert zur Referenzwertfindung, da Artefakte vorliegen können. In Anlehnung an Adolph (2008) wird eine Glättung der Landstraßendaten vollzogen, indem jeder Messwert durch den Mittelwert der 15 umliegenden Werte ersetzt wird, bevor schließlich das Minimum aus dieser bereinigten Datenreihe gebildet wird. Dieses Vorgehen findet für die Bildung des Referenzminimums der Herzschlagrate sowie des tonischen Hautleitwertes statt. Bei Letzterem ergibt sich ferner ein zweiter zu bestimmender Referenzwert, das Referenzwertmaximum, wie die spätere Kennwertberechnung zeigt. Die maximale Beanspruchung eines Probanden wird in der Szenerie der höchsten Komplexität, der Stadt, erwartet. Zur Bildung des Referenzmaximums des Hautleitwertes wird daher der Mittelwert über alle Maximalwerte der sechs betrachteten Kreuzungen gebildet, um wiederum Artefakteinflüsse weitestgehend auszuschließen.

Im Zuge der Referenzwertbildung werden teilweise unstimmige Wertezusammenhänge detektiert, die zu einem Ausschluss der Datensätze führen. Wird der Landstraßendatensatz eines Probanden als unplausibel im Rahmen der Datenaufbereitung identifiziert, fehlt der notwendige Referenzwert vollständig und die weiteren Kennwertbildungen sind nicht möglich. Ebenso werden Datensätze aufgrund fehlender Logikkonformität ausgeschlossen, sofern die Hautleitwerte auf der Landstraße höher ausfallen als in den Kreuzungsbereichen, sodass das Referenzwertminimum über dem Maximum liegt.

Für die Herzschlagfrequenz wird die Normierung für die Komplettbetrachtung von Autobahn und Landstraße sowie auch für die einzelnen Stadtsituationen dadurch erzielt, dass der zuvor bestimmte Referenzwert von der momentanen Herzschlagfrequenz (HSF_i) subtrahiert wird (Breuer et al., 1996). Die so errechnete Arbeitsherzschlagfrequenz (AHSF) (Breuer, 1996; Schlick et al., 2010) dient als Maß für die bei der Fahrzeugführung entstehenden erhöhten Beanspruchungsniveaus (Breuer, 1996). Die AHSF berechnet sich demnach aus nachstehender Formel und wird in Herzschläge pro Minute angegeben (Breuer, 1996):

$$AHSF = HSF_i - HSF_{Referenz} \text{ [bpm]}$$

Für die Normierung des tonischen Hautleitwertes findet die Range-Korrektur nach Lykken & Venables (1971) Anwendung. Dabei wird der normierte SCL-Wert (Arbeitshautleitwert, ASCL) durch Subtraktion des Referenzwertminimums vom Momentanwert (SCL_i) und anschließende Division durch die Spannweite des maximalen und minimalen Referenzwertes errechnet. Auch Giakoumis et al. (2013) wenden diese Normierung an. Diese Methode bietet den Vorteil, den minimal vorkommenden Wert als Referenzwert zu nehmen und keine womöglich in der Ruhephase auftretenden Schwankungen zu berücksichtigen.

$$ASCL = \frac{SCL_i - SCL_{Referenz}}{SCL_{max} - SCL_{Referenz}}$$

Die Auswertung des Kennwerts der Herzschlagfrequenz ist angelehnt an die Methodik von Adolph (2008) und in ihrem Grundprinzip der Medianbildung für alle Szenarien gleich.

In Analogie wird auch der tonische Hautleitwert durch Bildung des Medians über den Arbeitshautleitwert während der Landstraßen- bzw. Autobahnfahrt errechnet.

Zur Bestimmung des Kennwerts der SCR-Amplitude findet LEDALAB Anwendung. Die Software trennt zunächst die tonischen von den phasischen Signalanteilen. Anschließend können die SCR-Amplituden anhand einer Kriterienfestlegung identifiziert und exportiert werden. Die Literatur nennt einen Anstieg im Bereich von 0,04-0,01 μ S für eine Amplitudendetektion als aussagekräftig (Braithwaite, Watson, Jones & Rowe, 2013). LEDALAB orientiert sich an einem in diesen Bereich fallenden Richtwert von 0,01 μ S. Über die so identifizierten SCR-Amplituden wird wiederum der Median gebildet, um einen charakteristischen Kennwert je Proband zu erhalten.

Die Herzschlagvariabilität kann über verschiedene Kennwerte berechnet werden (European society of cardiology, 1996). Unterschieden werden kann in diesem Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzbereich (Rose, Oehme, Kolrep & Jürgensohn, 2005). Kennwerte im Frequenz- und Zeitbereich unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Anwendungsbereiche. Während Kennwerte des Frequenzbereichs eher für Langzeitbetrachtungen anzuwenden sind, liefert eine Analyse im Zeitbereich Hinweise zur Kurzzeitvariabilität (Böckelmann & Sammito, 2013). Da es sich bei Fahrversuchen meist um kurzzeitige Betrachtungen handelt, werden die Zeitbereichs-Parameter rMSSD und pNN50 hier näher betrachtet. Untersucht wird dabei stets die Streubreite zwischen einzelnen Herzschlag-Intervallen. Insbesondere der rMSSD gilt als eines der bedeutsamsten Maße der HRV-Forschung (NEUROCOR, 2014). Tabelle 4.15 gibt einen Überblick über die Berechnungsformeln und Merkmale der Parameter.

Tabelle 4.15: Informationen zu den HRV-Parametern (in Anlehnung an Böckelmann & Sammito, 2013).

	rMSSD	pNN50
Berechnungsformel	$rMSSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (NN_i - NN_{i+1})^2}{n-1}}$	-
Definition	Quadratwurzel des quadratischen Mittelwerts der Summe aller Differenzen sukzessiver RR-Intervalle	Prozentsatz aufeinanderfolgender RR-Intervalle, die mehr als 50 ms voneinander abweichen
Interpretation	Betrachtung des parasympathischen Einflusses	Ein hoher pNN50-Wert bedeutet hohe spontane Änderungen der Herzrate
Einheit	[ms]	[%]

4.6 Versuchsdesign

Das Versuchsdesign der Untersuchungsreihe leitet sich aus der Zielsetzung der Quantifizierung des Einflusses der ausgewählten Gestaltungsparameter Bewegungssimulation und Sichtwinkel horizontal auf die Fahrerverhaltensvalidität ab. Entsprechend werden diese Fahr-

simulator-Komponenten systematisch variiert (Tabelle 4.16). Es wird hierzu eine sukzessive Ausweitung der Gestaltungsparameter von einem Minimalaufbau hin zu einem Fahrsimulator mit höherer Darstellungsgüte (Maximalaufbau) vollzogen.

Tabelle 4.16: Übersicht über die vier Parametersets im Fahrsimulatorversuch.

	FOV horizontal 60°	FOV horizontal 180°
Statischer Fahrsimulator	Parameterset 1 (Minimalaufbau)	Parameterset 2 (FOV erweitert)
Dynamischer Fahrsimulator	Parameterset 3 (dynamisch)	Parameterset 4 (Maximalaufbau)

Im Bereich der vestibulären Wahrnehmung stellt ein kleines, kostengünstiges Bewegungssystem, wie es im herangezogenen Fahrsimulator vorhanden ist, den ersten Ausweitungsschritt vom statischen Fahrsimulator weg dar. Es werden entsprechend sowohl eine statische Fahrsimulatoreausführung als auch eine dynamische Konfiguration untersucht.

Um die Parametervariationen des FOV horizontal zu realisieren, wird ebenfalls eine sukzessive Erweiterung, ausgehend von einem Minimalaufbau, vollzogen. Entsprechend werden die beiden äußeren Monitore des Fahrsimulators bei ausgewählten Versuchsfahrten hinzugeschaltet (Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10) und so eine Sichtfelderweiterung von 60° bei einem Monitor auf 180° bei drei Monitoren erzielt.

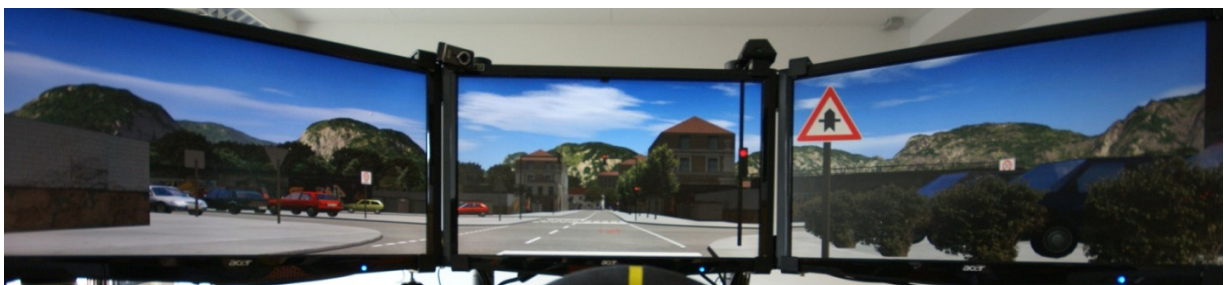


Abbildung 4.9: FOV horizontal von 180° mit drei Monitoren.

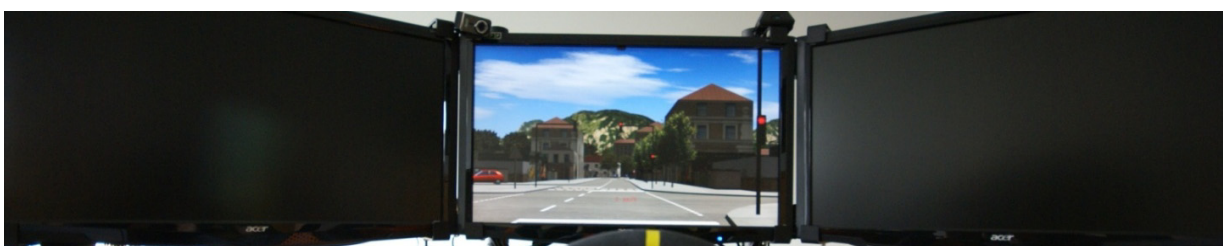


Abbildung 4.10: FOV horizontal von 60° mit einem Monitor.

Die Validierungsstudie setzt sich entsprechend aus einer Feldfahrt und insgesamt vier Simulatorfahrten zusammen. Jeder Proband fährt somit fünf Mal die vorgestellte Versuchsstrecke. Um Sequenzeffekte der Versuchsstrecke und einen eventuellen Reihenfolgeeffekt der Parametervariationen auszuschließen, werden die Szenarien und Parametersets über die Ver-

suchsreihe hinweg permutiert. So entstehen sechs verschiedene Probandengruppen, innerhalb derer auf eine ausgewogene Geschlechterverteilung geachtet wird. Tabelle 4.17 zeigt den Versuchsplan, der die Szenarien- und Parametersetfolgen für die einzelnen Probandengruppen enthält.

Die erste Zahl der Matrixeinträge betitelt hierbei die Probandengruppenzuordnung (PG1 bis PG6), während die zweite Ziffer die Versuchsnummer angibt (V1 bis V5). Der Feldversuch wird gezielt als letzte Versuchsfahrt eingeplant, um zum einen die Motivation der Probanden bis zum Abschluss der Versuchsfahrt hoch zu halten und zum anderen Probanden, die möglicherweise aufgrund von Simulatorkrankheit ausfallen, frühzeitig in den ersten Versuchsfahrten zu identifizieren.

Tabelle 4.17: Versuchsplan: Zuordnung der 6 Probandengruppen zu den Parametersetfolgen und Szenerieabfolgen (S = Stadt, L = Landstraße, A = Autobahn; PG = Probandengruppe; V = Versuchsnummer).

Szenerieabfolge	Feldfahrt	Fahrsimulatorfahrten			
		Parameterset 1 (Minimalaufbau) <i>- 1 Monitor</i> <i>- Ohne Bewegung</i>	Parameterset 2 (FOV) <i>- 3 Monitore</i> <i>- Ohne Bewegung.</i>	Parameterset 3 (Dyn) <i>- 1 Monitor</i> <i>- Mit Bewegung</i>	Parameterset 4 (Maximalaufbau) <i>- 3 Monitore</i> <i>- Mit Bewegung</i>
S, L, A	PG1 - V5	PG2 - V2	PG4 - V4	PG6 - V3	PG3 - V1
S, A, L	PG2 - V5	PG6 - V4	PG3 - V3	PG5 - V1	PG4 - V2
L, S, A	PG3 - V5	PG1 - V1	PG5 - V3	PG2 - V4	PG6 - V2
L, A, S	PG4 - V5	PG3 - V4	PG2 - V1	PG1 - V3	PG5 - V2
A, S, L	PG5 - V5	PG4 - V3	PG6 - V1	PG3 - V2	PG1 - V4
A, L, S	PG6 - V5	PG5 - V4	PG1 - V2	PG4 - V1	PG2 - V3

4.7 Versuchsdurchführung

Jeder an der Validierungsstudie teilnehmende Proband hat insgesamt fünf Fahrten an drei Versuchstagen zu absolvieren (Abbildung 4.11). Die Simulatorversuche finden im Zeitraum Juni bis Juli 2013 statt. Die jeweils von einem Probanden vorzunehmenden vier Versuchsfahrten im Simulator werden auf zwei Versuchstage aufgeteilt (2 x 2 Fahrten). Der Abstand zwischen beiden Versuchstagen wird dabei für alle Probanden so gewählt, dass ca. eine Woche Pause zwischen den Versuchen liegt. So ist gewährleistet, dass die Erinnerung an die Versuchsstrecke und Simulatoreigenschaften für alle Probanden identisch ist. Die Feldversuche finden im Oktober 2013 im Verkehrsraum Darmstadt statt. Als Zeitbedarf pro Proband sind für jeden Versuchstag im Fahrsimulator 2,25 Stunden und für den Feldversuch 2 Stunden kalkuliert.

Die Versuchsdurchführung zwischen den Versuchsfahrten im Feld und im Simulator gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungsumgebungen etwas anders. Im Folgenden

wird daher zunächst die Versuchsdurchführung im Simulator erläutert, bevor kurz auf Besonderheiten bzw. Abweichungen bei den Feldversuchen eingegangen wird.

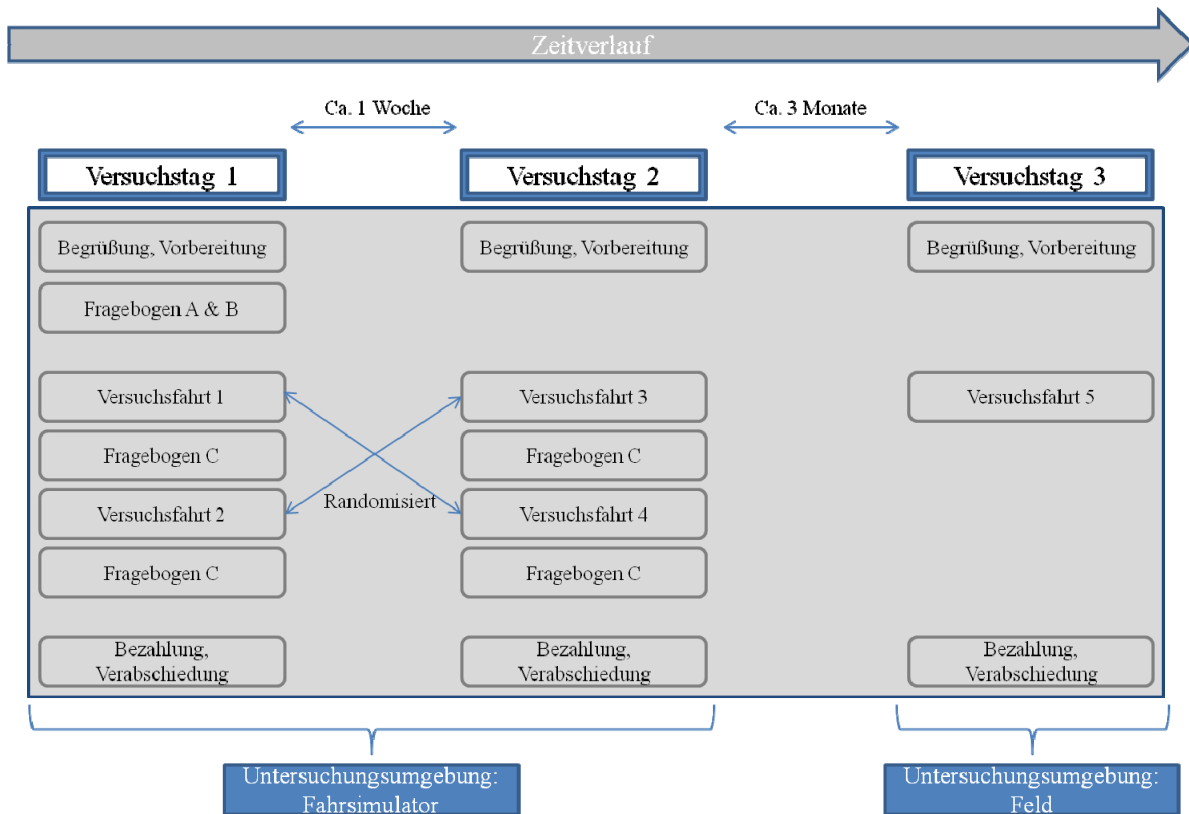


Abbildung 4.11: Zeitliche Abfolge der Versuchsfahrten.

Zur Durchführung der Fahrversuche am Simulator steht eine Gruppe von fünf Versuchsleitern zur Verfügung, von denen in der Regel zwei an einem Versuchstag anwesend sind. Die Probanden werden von den Versuchsleitern über das Untersuchungsziel der Studie in Kenntnis gesetzt. Vor der Einweisung in den Versuchsaufbau werden sie gebeten, eine Einverständniserklärung zu unterzeichnen sowie zwei Fragebögen zu allgemeinen personenbezogenen Angaben (Fragebogen A) und zu persönlichen Erfahrungen (Fragebogen B) auszufüllen. Im Anschluss daran beginnt die Versuchsvorbereitung mit der Anbringung der Elektroden für die Messung physiologischer Kennwerte und mit der Kalibration des Eye-Tracking-Systems für die Blickbewegungserfassung. Es folgen abschließende Hinweise zum jederzeit möglichen Versuchsabbruch bei Übelkeitsanzeichen und zur Abfolge der Versuchsfahrten. Der Proband erhält den Fahrauftrag, „wie immer“ zu fahren und sich an die StVO zu halten. Um das Auftreten von Simulatorübelkeit zu reduzieren, erhält jeder Proband die Möglichkeit, sich im Rahmen einer 10minütigen Eingewöhnungsfahrt an den Simulator zu gewöhnen. Diese Strecke ist mit einem steigenden Komplexitätsgrad an Fahrsituationen versehen, um den Probanden sukzessive an den Simulator heranzuführen. Nach Abschluss der Eingewöhnung werden die Messsysteme gestartet und die erste Versuchsstrecke entsprechend dem Versuchsplan (Tabelle 4.17) geladen. Eine Versuchsfahrt dauert ca. 40 Minuten. Am Ende jeder Fahrt wird dem Probanden Fragebogen C zum subjektiven Realitätsempfinden gereicht, den dieser im

Simulator sitzend ausfüllt, während über eine Dauer von 2 Minuten das Basisniveau der physiologischen Kennwerte gemessen wird. Anschließend beginnt Versuchsfahrt zwei, die ebenfalls mit der Aufzeichnung des Basislevels und dem Ausfüllen des Fragebogens C endet. Der Proband erhält schließlich eine Aufwandsentschädigung und wird verabschiedet.

Die Feldversuche im Verkehrsraum Darmstadt starten und enden auf dem Gelände des Fachbereichs Maschinenbau der TU Darmstadt an der Lichtwiese. Der Versuchsablauf gestaltet sich hier größtenteils identisch wie bei den Versuchen im Simulator. Das Ausfüllen der drei Fragebögen entfällt jedoch, da die Daten aus Bogen A und B von jedem Probanden bereits vorliegen und Fragebogenteil C den Realitätsgrad der Simulatorfahrt abfragt, der im Feld nicht beurteilt werden kann. Es ist jedoch erneut eine Einverständniserklärung auszufüllen, die die Bereitschaft zur Teilnahme am Fahrversuch ebenso bestätigt wie das Einverständnis bzgl. der Datenaufzeichnung und –verwertung zu Forschungszwecken. Als weitere Abweichung zum Simulatorversuch werden die Probanden in die Zeitsynchronisierung eingewiesen, da ihnen im Rahmen der Synchronisierung, im Gegensatz zur Simulatorfahrt, durch die Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers auf Kommando eine aktive Rolle zukommt. Zudem findet während der Feldversuche eine Dokumentation der Umfeldbedingungen wie Nässe und Wetter statt⁹.

4.8 Detaillierung der Untersuchungshypothesen

Im Anschluss an die Vorstellung der wichtigsten Untersuchungskonzept-Aspekte findet eine weitere Detaillierung der in Kapitel 4.1 aufgestellten Leithypothesen statt, bevor die entsprechenden Ergebnisse aufgezeigt werden.

4.8.1 Detaillierung der Leithypothesen LH₁₋₄

Die Detaillierung der Hypothesen erfolgt in tabellarischer Übersicht, getrennt nach den Kennwertkategorien. Dabei steht in der ersten Spalte einer Tabelle der jeweilige Kennwert (M=Mittelwert, Min=Minimalwert, Max=Maximalwert, SD=Standardabweichung) und in der zweiten Spalte die Abkürzung des jeweils betrachteten Szenarios. Die vier anschließenden Spalten beinhalten schließlich die Hypothesenformulierung. Diese erfolgt für die einzelnen Parametersets getrennt und beschreibt dabei stets einen Vergleich der Daten aus der Feldstudie mit der entsprechenden Fahrsimulatorfahrt Set 1 – Set 4. Dabei wird übergreifend davon ausgegangen, dass sich ein Kennwert in Feld und einer der Simulatorfahrten signifikant voneinander unterscheidet und somit keine Validität anzunehmen ist ($\mu_{\text{Set}i} \neq \mu_{\text{Feld}}$). Eine Motivation der Hypothesen findet sich in Kapitel 3 im Rahmen der Vorstellung des Modells.

⁹ Bei 29% der Probandenfahrten war die Straße nass. Jedoch waren die Straßenverhältnisse nie so unterschiedlich, dass eine Beeinträchtigung des Fahrverhaltens zu erwarten war.

Die detaillierten Hypothesen für die Fahrdynamik-Kennwerte finden sich in Tabelle 4.18. Exemplarisch wird eine Hypothese ausformuliert, um die verwendete mathematische Beschreibung anschaulich zu gestalten.

Die mittlere Geschwindigkeit bei einer Freien Fahrt auf der Autobahn unterscheidet sich bei einer Versuchsfahrt im Feld und in einem Fahr Simulator mit Parameterset 1 signifikant voneinander ($M_Geschwindigkeit_A_FrF_ \mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$).

Tabelle 4.18: Detaillierung der Hypothesen für die Fahrdynamikkennwerte (A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, FrF = Freie Fahrt, FoF = Folgefahrt, A = Abbiegevorgänge, O = Ohne Richtungsänderung).

Kennwerte	Szenario	LH ₁	LH ₂	LH ₃	LH ₄
		Feld - Set 1	Feld - Set 2	Feld - Set 3	Feld - Set 4
M_Geschwindigkeit	A_FrF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FrF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	S_A	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	S_O	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
Max_Geschwindigkeit	A_FrF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FrF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
M_Abstand	A_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
Min_Abstand	A_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
M_TTC	A_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
Min_TTC	A_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
SD_Gaspedal	A_FrF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FrF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	A_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
SD_Lenkradwinkel	A_FrF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FrF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	A_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FoF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	S_A	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	S_O	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
SD_Gierrate	A_FrF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$
	L_FrF	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set1}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set2}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set3}$	$\mu_{Feld} \neq \mu_{Set4}$

Kennwerte	Szenario	LH ₁	LH ₂	LH ₃	LH ₄
		Feld - Set 1	Feld - Set 2	Feld - Set 3	Feld - Set 4
SD_Gierrate	A_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	S_A	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	S_O	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$

Eine Detaillierung der Hypothesen der Fahrerverhaltenskennwerte findet sich in Tabelle 4.19. Hier wird das Blickverhalten der Probanden näher untersucht. Relevante Kennwerte in diesem Zusammenhang sind die relative Fixationsdauer und –häufigkeit auf bestimmte AOI. Dabei wird bei der Hypothesenformulierung keine Differenzierung nach diesen Interessensbereichen sowie auch nicht nach einzelnen Szenarien vorgenommen, da größtenteils keine Unterschiede zwischen diesen Variablen erwartet werden. Die Szenarien werden entsprechend als Ganzes betrachtet.

Tabelle 4.19: Detaillierung der Hypothesen für die Fahrerverhaltenskennwerte (A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, G = Gesamtszenarie).

Kennwerte	Szenario/ Szenarie	LH ₁	LH ₂	LH ₃	LH ₄
		Feld - Set 1	Feld - Set 2	Feld - Set 3d	Feld - Set 4
Relative Fixationsdauer aller AOIs	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
Relative Fixationshäufigkeit aller AOIs	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$

Tabelle 4.20 zeigt die näheren Ausführungen zu den physiologischen Kennwerten. Auch bei dieser Kennwert-Kategorie findet keine Einteilung in Szenarien statt, da keine Unterschiede innerhalb einer Szenarie erwartet werden.

Tabelle 4.20: Detaillierung der Hypothesen für die physiologischen Kennwerte (A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, G = Gesamtszenarie).

Kennwerte	Szenario/ Szenarie	LH ₁	LH ₂	LH ₃	LH ₄
		Feld - Set 1	Feld - Set 2d	Feld - Set 3	Feld - Set 4
Herzschlagfrequenz	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
Hautleitwert	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$

Kennwerte	Szenario/ Szenerie	LH ₁	LH ₂	LH ₃	LH ₄
		Feld - Set 1	Feld - Set 2d	Feld - Set 3	Feld - Set 4
Herzschlagvariabilität	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$

4.8.2 Detaillierung der Leithypothese LH_R

Auch die näheren Ausführungen zu Leithypothese LH_R legen eine tabellarische Aufbereitung nahe (Tabelle 4.21). Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Hypothesen findet hier kein Vergleich zwischen dem Feldversuch und den verschiedenen Fahrsimulatorfahrten statt, da der Realitätsgrad nur in simulierter Untersuchungsumgebung abgefragt wird. Entsprechend betrachten die Hypothesen jeweils zwei verschiedene Parametersets miteinander, um den Einfluss des horizontalen Sichtwinkels (FOV) bzw. der Bewegungssimulation (Dyn) auf die abgefragten Aspekte zu analysieren. Die Hypothesenformulierung erfolgt dabei gerichtet, um eine klare Reihenfolge zu erhalten, welche der Fahrsimulator-Varianten den höchsten subjektiven Realitätsgrad aufweist.

Tabelle 4.21: Detaillierung der Hypothesen für die subjektiven Kennwerte (Jeder Kennwert entspricht dem Mittelwert eines konkreten Fragebogenitems; FOV = Field of View bzw. Sichtwinkel horizontal, Dyn = Dynamik).

Kennwerte	Einfluss FOV		Einfluss Dyn	
	Set 1 – Set 2	Set 3 – Set 4	Set 1 – Set 3	Set 2 – Set 4
Realitätsgrad Simulatorfahrt	$\mu_{\text{Set1}} < \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Set3}} < \mu_{\text{Set4}}$	$\mu_{\text{Set1}} < \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Set2}} < \mu_{\text{Set4}}$
Übelkeitsgefühl	$\mu_{\text{Set1}} < \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Set3}} < \mu_{\text{Set4}}$	$\mu_{\text{Set1}} > \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Set2}} > \mu_{\text{Set4}}$
Schwierigkeitsgrad Geschwindigkeitsregelung	$\mu_{\text{Set1}} > \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Set3}} > \mu_{\text{Set4}}$	-	-
Schwierigkeitsgrad Beschleunigungseinschätzung	-	-	$\mu_{\text{Set1}} > \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Set2}} > \mu_{\text{Set4}}$
Schwierigkeitsgrad Abstandseinschätzung	$\mu_{\text{Set1}} > \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Set3}} > \mu_{\text{Set4}}$	-	-
Schwierigkeitsgrad Kurvenlenkung	$\mu_{\text{Set1}} > \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Set3}} > \mu_{\text{Set4}}$	$\mu_{\text{Set1}} > \mu_{\text{Set3}}$	$\mu_{\text{Set2}} > \mu_{\text{Set4}}$
Realitätsgrad Größe der Projektionsfläche	$\mu_{\text{Set1}} < \mu_{\text{Set2}}$	$\mu_{\text{Set3}} < \mu_{\text{Set4}}$	-	-
Realitätsgrad Bewegungssimulation	-	$\mu_{\text{Set3}} < \mu_{\text{Set4}}$	-	-

4.8.3 Motivation der Leithypothese LH_S

Die Leithypothese LH_S wird im Modell (Kap. 3) nicht näher motiviert, um die Komplexität des Modells begrenzt zu halten. Daher findet in diesem Abschnitt eine Erklärung statt, warum ein Einfluss des Szenarios auf die Wirkungsstärke der variierten Gestaltungsparameter vermutet wird. Eine nähere Detaillierung der Leithypothese bleibt aus, da sie lediglich deskriptiv überprüft wird. Es wird angenommen, dass das Szenario bzw. die Szenerie als Mediator wirkt und die Größe des Einflusses der Gestaltungsparameter regelt. Dies soll anhand von Beispielen veranschaulicht werden.

Die Erweiterung des horizontalen Sichtwinkels von 60° auf 180° wird sich vor allem in kurvenreichen Streckenabschnitten positiv auf die Querführung auswirken. Entsprechend wird erwartet, dass die Querführungskennwerte in dem Szenario Stadt Abbiegevorgänge stärker positiv im Sinne der Validität beeinflusst werden als auf relativ geraden Streckenverläufen wie bei der Autobahn oder Landstraße. Hinsichtlich der Längsführung wird durch eine Sichtwinkelerweiterung die Geschwindigkeitseinschätzung erleichtert. Durch die Erweiterung der peripheren Sicht wird der optische Fluss stärker ausgeprägt und der Proband kann die zulässige Geschwindigkeit besser einhalten. Es wird erwartet, dass die Kennwerte Gaspedalposition und Geschwindigkeit gerade auf der Landstraße in Richtung Validität verbessert werden, da hier generell wenige Orientierungsobjekte vorhanden sind, anhand derer der Fahrer seine Geschwindigkeit abschätzen kann.

Das Vorhandensein einer Bewegungsplattform wird sich in der Stadt stärker auf die Längs- und Querführungskennwerte auswirken als auf der Landstraße und Autobahn. Dies wird vermutet, da Innerorts ständige Stop-and-Go-Situationen auftreten, bei denen Beschleunigungskräfte deutlich zu spüren sind. Auf Autobahn sowie Landstraße hingegen finden nach einer einmaligen Beschleunigung auf die Wunschgeschwindigkeit meist nur geringe Geschwindigkeitsanpassungen statt.

5 Ergebnisse der Validierungsstudie

5.1 Statistische Grundlagen

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Fahrversuche in Feld und Fahrsimulator dargestellt. Dabei wird sowohl auf die deskriptiven Daten als auch auf die Interferenzstatistik und somit die Hypothesenüberprüfung eingegangen.

Die deskriptiven Daten werden jeweils für einen Kennwert in einem Balkendiagramm, unter Angabe des arithmetischen Mittels (im Folgenden Mittelwert genannt) als Lagemaß und der Standardabweichung als Dispersionsmaß (Bortz, 2005), dargestellt. Dabei erfolgt eine Einteilung in die verschiedenen Szenarien. Zur Berechnung des Mittelwerts muss ein kardinalskaliertes Merkmal vorliegen (Bortz, 2005). Die Fahrdynamikkennwerte, fahrerverhaltensbezogenen Kennwerte und physiologischen Kennwerte erfüllen diese Voraussetzung, da es sich um intervallskalierte Merkmale handelt, die somit zur Kardinalskala-Klasse gehören. Bei den Ergebnissen der subjektiven Befragung handelt es sich hingegen mit einer ordinalen Skalierung um ein niedrigeres Skalenniveau. Eine Ordinalskala kann jedoch als intervallskaliert behandelt werden, sofern ihre Messwerte äquidistant sind (Spatz, 2008); dies ist bei der Befragung zum subjektiven Realitätsempfinden gegeben.

Zur statistischen Auswertung der Versuchsdaten sowie letztlich zur Überprüfung der aufgestellten Hypothesen werden verschiedene Testverfahren angewandt. Als Signifikanzniveau wird dabei $\alpha = 0,05$ festgelegt. Abbildung 5.1 gibt einen Überblick über das statistische Vorgehen in Abhängigkeit der Stichprobegegebenheiten. Dabei sind im Rahmen dieser Arbeit nicht benötigte Verfahren nicht weiter aufgeführt und die grafische Darstellung an dieser Stelle abgebrochen (✂).

Im Bereich der **Leithypothesen LH₁-LH₄** finden paarweise Mittelwertsvergleiche zwischen den Kennwerten aus dem Feld und jeweils einem Simulator-Parameterset statt. Es handelt sich dabei um zwei voneinander abhängige Stichproben, da identische Probanden an den Versuchen teilnehmen. Die Überprüfung auf Normalverteilung findet mittels **Kolmogorov-Smirnov-Test** statt (Field, 2009). Sofern eine Normalverteilung der beiden Stichproben vorliegt, wird ein **T-Test für abhängige Stichproben** durchgeführt, während bei fehlender Normalverteilung der **Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test** als nichtparametrischer Test (Field, 2009) Anwendung findet. Bei der Anwendung des T-Tests ist eine weitere Bedingung zu überprüfen. So ist bei gepaarten Stichproben darauf zu achten, dass der Korrelationskoeffizient eines Kennwertpaares positiv ist, da im umgekehrten Fall der T-Test an Teststärke und Gültigkeit verliert (Bortz, 2005). Trifft diese Bedingung nicht zu, wird ebenfalls auf einen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zurückgegriffen, wie es von Bortz (2005) empfohlen wird. Als Ergebnis aus dem Mittelwertsvergleich kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die betrachteten Mittelwerte signifikant voneinander abweichen ($p \leq 0,05$) oder nicht. Sofern ein signifikanter Unterschied zwischen dem mittleren Kennwert aus dem Feldversuch und

dem mittleren Kennwert aus dem Simulatorversuch vorliegt, kann dies als fehlende absolute Validität interpretiert werden. Das Fahrerverhalten bzgl. des betrachteten Kennwerts unterscheidet sich demnach signifikant, sodass keine Übertragbarkeit zwischen den Untersuchungsumgebungen angenommen werden kann. Der Testwert t bzw. z gibt dabei Aufschluss über das Verhältnis der Mittelwerte zueinander und liefert so einen Hinweis über die Richtung der Abweichung. Liegt hingegen kein signifikanter Unterschied zwischen den Untersuchungsumgebungen vor, wird dies als Indiz für absolute Validität interpretiert.

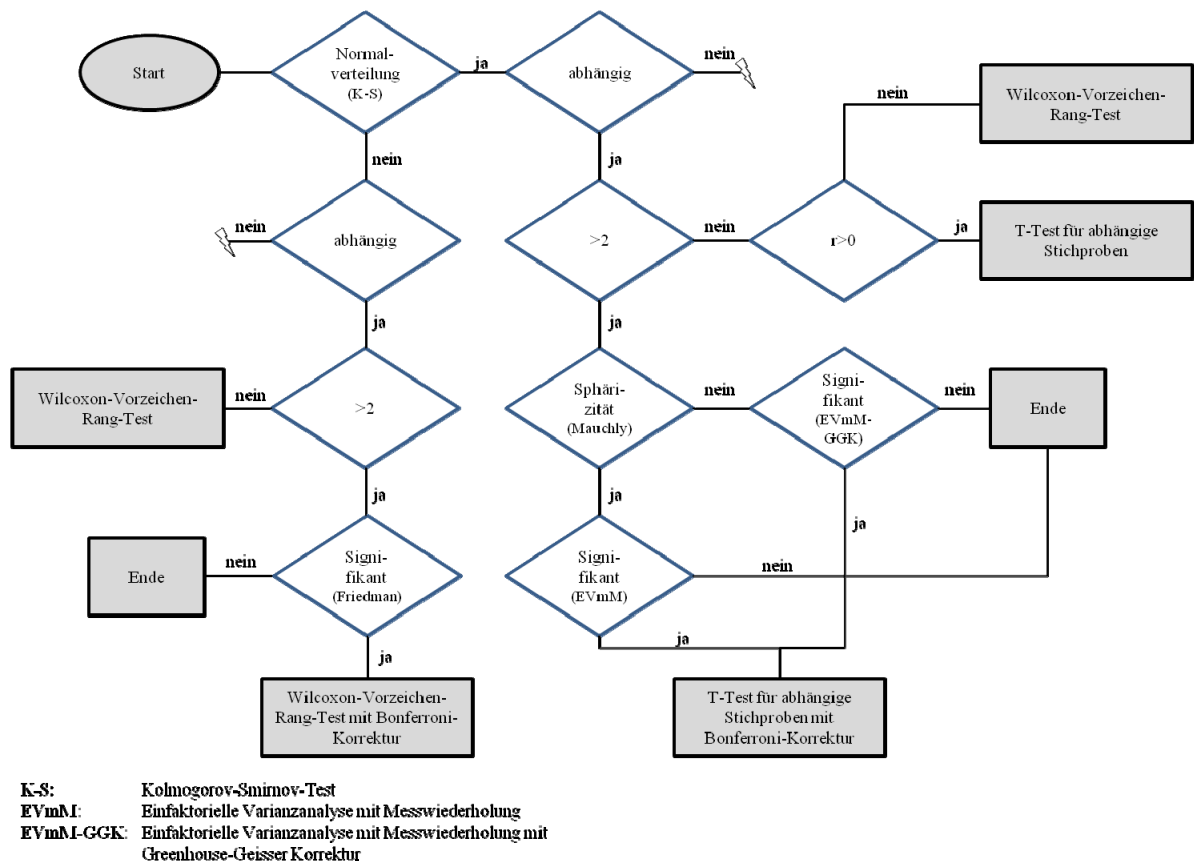


Abbildung 5.1: Übersicht über das statistische Vorgehen nach Bortz (2005) und Field (2009).

Bei der Überprüfung der **Leithypothese LH₅** sowie **Leithypothese LH_s**, findet eine Betrachtung mehrerer Stichproben statt, um die Frage nach einem Einfluss der Variable Parameterset auf die Kennweltergebnisse zu beantworten. Entsprechend werden alle Stichproben aus den Fahrsimulatorfahrten in die Analyse mit einbezogen und, im Falle einer Normalverteilung, eine **ein faktorielle Varianzanalyse (analysis of variance, ANOVA) mit Messwiederholung** durchgeführt (Field, 2009). Im Anschluss wird die zweite Bedingung der Varianzanalyse mit Messwiederholung überprüft: der **Mauchly-Test auf Sphärizität**. Dieser Test überprüft die Ähnlichkeit (Homogenität) der Korrelationen zwischen den Faktorstufen (Field, 2009). Bei Signifikanz ($p \leq 0,05$) ist die Annahme der Sphärizität verletzt, die Korrelationen sind nicht homogen und eine **Greenhouse-Geisser-Korrektur** ist eine mögliche Abhilfe. Kann die Sphärizität angenommen werden, kann der Test der Innersubjekteffekte ohne Korrektur erfolgen. Im Rahmen des Tests auf Innersubjekteffekte wird schließlich die eigentliche Va-

rianzanalyse für den Messwiederholungsfaktor gerechnet. Für $p \leq 0,05$ leistet der Messwiederholungsfaktor (hier die Variable Parameterset) einen signifikanten Beitrag. Ist dies der Fall, wird schließlich eine Post-hoc-Analyse zwischen den Stufen des messwiederholten Faktors durchgeführt. Hierbei handelt es sich um einen **paarweisen Mittelwertsvergleich (T-Test) mit Bonferroni-Korrektur**, um zu erkennen, welche der Mittelwerte signifikante Differenzen aufweisen (Bortz, 2005). So kann eine Aussage darüber getroffen werden, welche Parametersets sich signifikant voneinander unterscheiden. Signifikanz liegt in diesem Falle ebenfalls bei einem Wert von $p \leq 0,05$ vor, da die Bonferroni-Korrektur bereits während der Berechnung erfolgt und in den Ergebnissen somit berücksichtigt ist. Es erfolgt jedoch eine manuelle Anpassung der p-Werte, da es sich um einseitige Tests handelt. Der p-Wert wird gemäß Duller (2013) halbiert. Diese Anpassung ist in den nachfolgend vorgestellten Ergebnissen sowie auch in der ausführlichen Ergebnisübersicht im Anhang bereits berücksichtigt. Liegt jedoch bei einer der betrachteten Stichproben keine Normalverteilung vor, sind die Voraussetzungen für eine ANOVA mit Messwiederholung nicht gegeben. **Friedman's ANOVA** als nichtparametrischer Test findet Anwendung. Er eignet sich ähnlich dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für abhängige Variablen, kann aber für den Vergleich von mehr als zwei Bedingungen herangezogen werden, wie dies vorliegend der Fall ist. Sofern sich der Test als signifikant herausstellt, gilt ein Einfluss des Messwiederholungsfaktors als belegt und die Post-hoc-Analyse findet Anwendung. Mithilfe des **Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests** kann identifiziert werden, zwischen welchen Versuchsbedingungen signifikante Unterschiede vorherrschen. Hier findet wiederum ein gerichteter Test statt, sodass der p-Wert halbiert wird. Die auch hier notwendige Bonferroni-Korrektur wird in diesem Fall nach der eigentlichen Test-Berechnung berücksichtigt. Aufgrund der Bonferroni-Korrekturmaßnahme liegt bei diesem Test das Signifikanzniveau bei $\frac{\alpha}{k}$, wobei k die Anzahl der Messwiederholungen ist. Im konkreten Fall ergibt sich ein Signifikanzniveau von $\alpha = \frac{5}{4} = 0,0125$. Die entsprechenden p-Werte, bei denen dieses korrigierte Signifikanzniveau zu berücksichtigen ist, werden sowohl in der nachfolgenden Ergebnisvorstellung als auch im Anhang mit einem hochgestellten „b“ gekennzeichnet. Bei allen anderen p-Werten gilt die übliche Signifikanzgrenze von $\alpha = 0,05$.

Die tabellarische Übersicht der Interferenzstatistik-Ergebnisse zur Hypothesenüberprüfung befindet sich, wie bereits angesprochen, im Anhang dieser Arbeit. Auf die wesentlichen Ergebnisse wird in den folgenden Abschnitten in Kürze eingegangen. Dabei erfolgt jeweils für alle Szenarien eine grafische Darstellung der deskriptiven Ergebnisse in Form eines Fehlerbalkendiagramms. Sofern entsprechende Untersuchungshypothesen für die Szenarien aufgestellt wurden, findet zudem eine tabellarische Zusammenstellung der deskriptiven Daten statt (\bar{x} = Mittelwert, σ = Standardabweichung).

5.2 Fahrdynamikkennwerte

Die grafische Darstellung der deskriptiven Ergebnisse für die Fahrdynamikkennwerte findet sich, für die einzelnen Szenarien getrennt, in den Abbildung 5.2 - Abbildung 5.7.

Mittlere Längsgeschwindigkeit: (Abbildung 5.2)

Für die Folgefahrt auf Landstraße und Autobahn erfolgte keine statistische Betrachtung der Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeit, da diese stark vom vorausfahrenden Fahrzeug beeinflusst wird und der Proband seine Geschwindigkeitswahl nicht unabhängig treffen kann. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der näher betrachteten Szenarien finden sich in Tabelle 5.1.

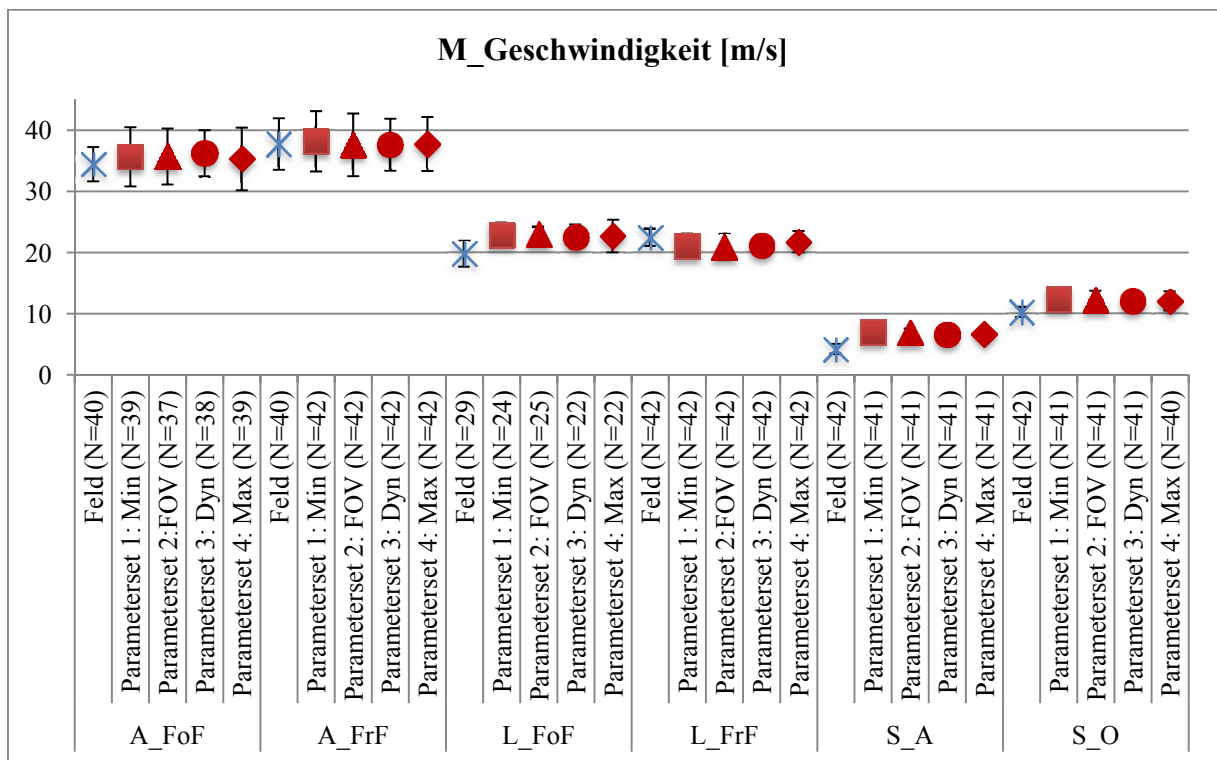


Abbildung 5.2: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Mittlere Geschwindigkeit" (A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, FrF = Freie Fahrt, FoF = Folgefahrt, A = Abbiegevorgänge, O = Ohne Richtungsänderung).

Tabelle 5.1: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Mittlere Geschwindigkeit“ in [m/s] (A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, FrF = Freie Fahrt, A = Abbiegevorgänge, O = Ohne Richtungsänderung).

	A_FrF		L_FrF		S_A		S_O	
Feld	$\bar{x} = 37,8$	$\sigma = 4,2$	$\bar{x} = 22,4$	$\sigma = 1,4$	$\bar{x} = 4,2$	$\sigma = 0,8$	$\bar{x} = 10,2$	$\sigma = 0,8$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 38,2$	$\sigma = 4,9$	$\bar{x} = 21,0$	$\sigma = 2,0$	$\bar{x} = 7,0$	$\sigma = 0,6$	$\bar{x} = 12,3$	$\sigma = 1,7$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 37,6$	$\sigma = 5,1$	$\bar{x} = 20,9$	$\sigma = 2,2$	$\bar{x} = 6,9$	$\sigma = 0,6$	$\bar{x} = 12,1$	$\sigma = 1,5$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 37,6$	$\sigma = 4,2$	$\bar{x} = 21,1$	$\sigma = 1,7$	$\bar{x} = 6,6$	$\sigma = 0,7$	$\bar{x} = 12,1$	$\sigma = 1,6$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 37,8$	$\sigma = 4,4$	$\bar{x} = 21,7$	$\sigma = 1,7$	$\bar{x} = 6,7$	$\sigma = 0,6$	$\bar{x} = 12,0$	$\sigma = 1,5$

Bei der *Freien Fahrt* auf der *Autobahn* liegen die mittleren Geschwindigkeiten, unabhängig von der Untersuchungsumgebung, nahe beieinander. Dies bestätigt die statistische Überprüfung der Hypothesen LH₁-LH₄; sie indiziert absolute Validität für die mittlere Geschwindigkeit in diesem Szenario, da kein signifikanter Unterschied zwischen Feld und einem der Parametersets im Fahrsimulator vorliegt. Entsprechend entfällt eine weitere Betrachtung der Hypothese LH₅.

Bei der *Freien Fahrt* auf der *Landstraße* zeigt sich eine leicht erhöhte mittlere Geschwindigkeit im Feld, verglichen mit der simulierten Umgebung. Die statistische Überprüfung der paarweisen Unterschiede mittels T-Test bzw. Wilcoxon-Test bestätigt diesen ersten Eindruck und weist für alle Parametersets eine signifikante Abweichung zu den Feldergebnissen auf (LH₁: $t(41) = 3,972$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -3,470$; $p = 0,001$; LH₃: $t(41) = 3,989$; $p = 0,000$; LH₄: $t(41) = 2,570$; $p = 0,014$). Es erfolgt eine nähere Analyse der Unterschiede zwischen den einzelnen Parametersets (LH₅). Die Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigt jedoch keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors auf die Ergebnisse.

In der *Stadt* liegen die gewählten Geschwindigkeiten für das Szenario *Abbiegevorgänge* im Fahrsimulator deutlich höher als im Feld. Die Überprüfung der Hypothesen LH₁ bis LH₄ mit Hilfe einer paarweisen Betrachtung zwischen Feld und Fahrsimulator zeigt, dass für keines der Parametersets eine Übereinstimmung der mittleren Geschwindigkeit mit den Feldergebnissen vorliegt und somit kein Indiz für absolute Validität erzielt wird (LH₁: $t(40) = -18,620$; $p = 0,000$; LH₂: $t(40) = -17,649$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -5,579$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -5,566$; $p = 0,000$). Auch hier erfolgt aufgrund des Ergebnisses eine nähere Betrachtung der Unterschiede zwischen den Parametersets im Rahmen einer ANOVA mit Messwiederholung (LH₅). Es zeigt sich ein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors auf die Ergebnisse ($F(2,468) = 6,123$; $p = 0,002$), sodass in einem weiteren Schritt eine paarweise Mittelwertsbetrachtung durchgeführt wird, um zu identifizieren, zwischen welchen Parametersets ein signifikanter Unterschied vorliegt. Dabei wird sowohl zwischen Parameterset 1 und 3 (Vergleich zwischen Minimalaufbau und einem dynamischen Fahrsimulator; $p = 0,002$) als auch zwischen Parameterset 1 und 4 (Vergleich zwischen einem Minimalaufbau und einem Maximalaufbau; $p = 0,026$) eine signifikante Abweichung festgestellt.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die mittlere Geschwindigkeitswahl im Szenario *Stadt Ohne Richtungsänderung*. Ein Vergleich der Mittelwerte der Geschwindigkeiten zwischen Feld und den vier Parametersets zeigt, dass keine absolute Validität anzunehmen ist (LH₁: $z = -5,260$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -5,138$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -5,112$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -4,906$; $p = 0,000$). Wie auch beim Szenario Stadt Abbiegevorgänge erfolgt eine weitere Analyse der Differenzen zwischen den Parametersets (LH₅). Hier kann kein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors auf die Ergebnisse nachgewiesen werden, sodass kein Einfluss der Variable Parameterset auf die Ergebnisse identifiziert werden kann.

Zusammenfassend lässt sich für den Kennwert mittlere Geschwindigkeit zeigen, dass nur in einem Szenario, der Freien Fahrt auf der Autobahn, ein Indiz für absolute Validität vorliegt. Dabei gilt das Ergebnis für alle vier Parametersets. Es zeigt sich somit ein eindeutiger Einfluss des Szenarios auf die Validitätsergebnisse (LH_5), da sich für die drei weiteren betrachteten Szenarien Landstraße Freie Fahrt, Stadt Abbiegevorgänge sowie Ohne Richtungsänderung für alle Fahrsimulatorkonfigurationen signifikante Unterschiede zu den Feldergebnissen ergeben. Die mittlere Geschwindigkeit lässt sich demnach in diesen Szenarien nicht valide in einem Fahrsimulator abbilden. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Parametersets (LH_5) lässt sich nur für das Szenario Stadt Abbiegevorgänge zwischen einem Minimalaufbau (Parameterset 1) und einem dynamischen Aufbau (Parameterset 3) sowie einem Maximalaufbau (Parameterset 4) nachweisen. Der Vergleich zwischen Parameterset 1 und Parameterset 2, der einer reinen Erweiterung des FOV horizontal entspricht, zeigt hingegen keine signifikanten Unterschiede. In der Stadt fahren die Probanden in simulierter Umgebung selbst bei erweiterter Sicht signifikant schneller als im Realen, was anhand der deutlich geringeren Verkehrsdichte im Fahrsimulator erklärt werden kann. Hier sind demnach deutliche Einflüsse der Untersuchungsmethodik zu erkennen, die zu den unerwarteten Ergebnissen geführt haben können.

Maximale Längsgeschwindigkeit: (Abbildung 5.3)

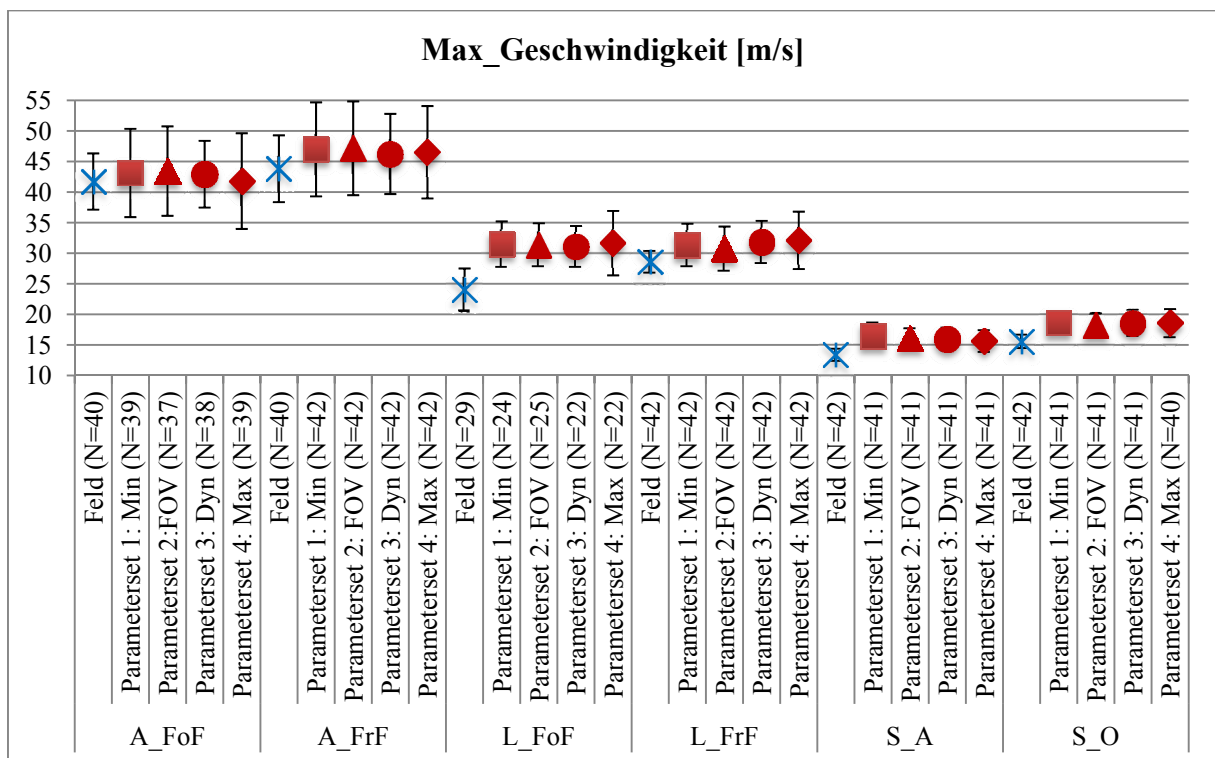


Abbildung 5.3: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Maximale Geschwindigkeit" (A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, FrF = Freie Fahrt, FoF = Folgefahrt, A = Abbiegevorgänge, O = Ohne Richtungsänderung).

In Analogie zur mittleren Geschwindigkeit findet auch die statistische Betrachtung der maximalen Geschwindigkeit nur für ausgewählte Szenarien statt. Lediglich die Freien Fahrten auf Autobahn und Landstraße werden näher analysiert, da der Proband hier weder eine maximal zulässige Geschwindigkeit vorfindet, noch seine Geschwindigkeitswahl durch einen vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer beeinflusst wird. Für diese Szenarien sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Geschwindigkeit Tabelle 5.2 zu entnehmen.

Tabelle 5.2: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Maximale Geschwindigkeit“ in [m/s] (A = Autobahn, L = Landstraße, FrF = Freie Fahrt).

	A_FrF		L_FrF	
Feld	$\bar{x} = 43,8$	$\sigma = 5,5$	$\bar{x} = 28,6$	$\sigma = 1,8$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 47,0$	$\sigma = 7,7$	$\bar{x} = 31,3$	$\sigma = 3,5$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 47,2$	$\sigma = 7,7$	$\bar{x} = 30,8$	$\sigma = 3,6$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 46,3$	$\sigma = 6,6$	$\bar{x} = 31,8$	$\sigma = 3,5$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 46,5$	$\sigma = 7,6$	$\bar{x} = 32,1$	$\sigma = 4,7$

Bei der *Freien Fahrt* auf der *Autobahn* fällt die gewählte Maximalgeschwindigkeit im Feld geringer aus als im Fahrsimulator. Eine statistische Überprüfung dieser Unterschiede mittels des T-Test zeigt für Parameterset 1 und 2 signifikante Unterschiede verglichen mit den Feldergebnissen (LH₁: $t(39) = -2,796$; $p = 0,008$; LH₂: $t(39) = -2,691$; $p = 0,010$), während Parameterset 3 und 4 keinen signifikanten Unterschied und somit ein Indiz für absolute Validität zeigen.

Bei der *Freien Fahrt* auf der *Landstraße* fällt die Differenz zwischen Feld und Fahrsimulator etwas geringer aus. Eine statistische Überprüfung der Unterschiede zwischen Feld und Fahrsimulator ergibt für alle vier Parametersets signifikante Ergebnisse und somit das Fehlen absoluter Validität (LH₁: $z = -3,932$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -3,007$; $p = 0,003$; LH₃: $z = -4,458$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -4,433$; $p = 0,000$). Auch hier zeigt eine weitere Betrachtung der Hypothese LH₅ keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors auf die Ergebnisse.

Für die maximale Geschwindigkeit kann ein Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Validitätsergebnisse identifiziert werden (LH₅). Während bei Freier Fahrt auf der Landstraße alle Fahrsimulatorfahrten signifikante Unterschiede zur Realfahrt aufweisen, wobei im Feld stets eine niedrigere Maximalgeschwindigkeit gewählt wird, zeigt sich für die Freie Fahrt auf der Autobahn nur ein Unterschied zwischen Feld und Parameterset 1 sowie 2. Dieses Ergebnis führt zu der weiteren Erkenntnis, dass es einen Einfluss des Parametersets auf die Validität gibt.

Mittlerer Abstand: (Abbildung 5.4)

Sowohl für den Mittelwert als auch für das Minimum des Abstandskennwerts werden nur die Folgefahrten auf Autobahn und Landstraße näher betrachtet, da nur hier der von den Probanden selbst gewählte Abstand zum Vorausfahrenden von Relevanz ist. Die deskriptiven Ergebnisse dieser Szenarien sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

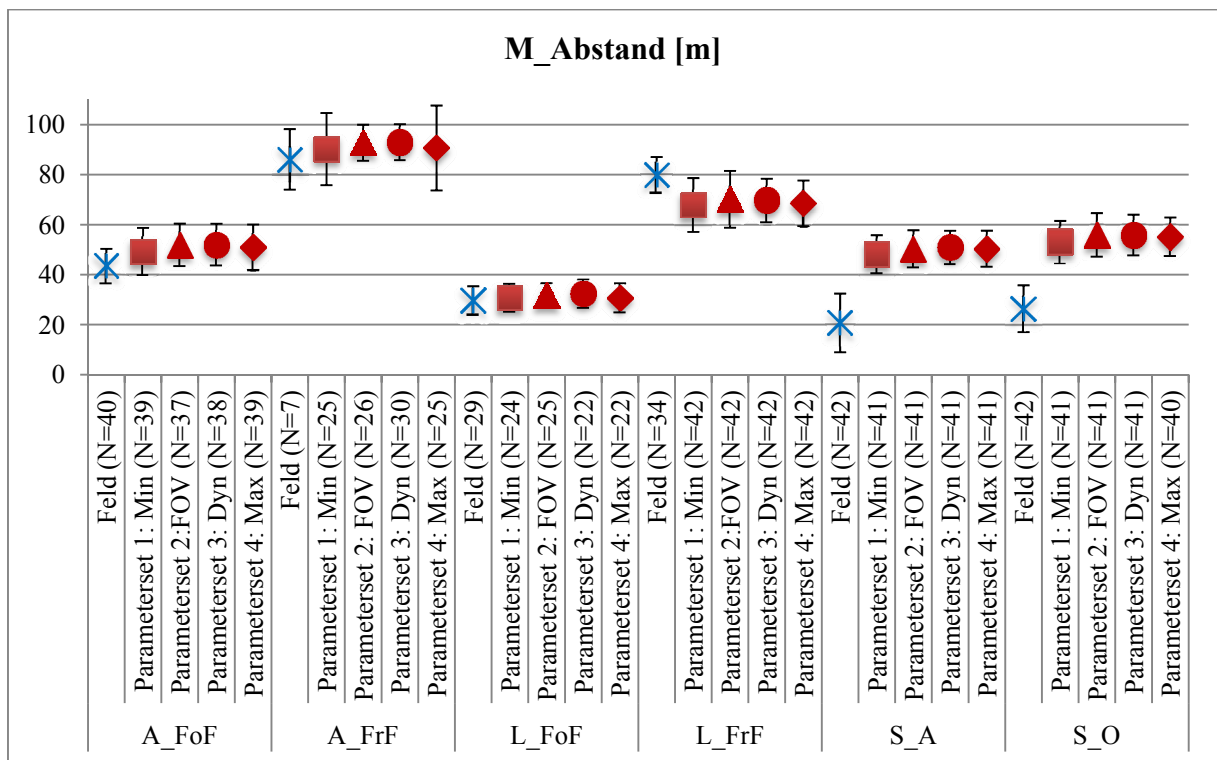


Abbildung 5.4: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Mittlerer Abstand" (A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, FrF = Freie Fahrt, FoF = Folgefahrt, A = Abbiegevorgänge, O = Ohne Richtungsänderung).

Tabelle 5.3: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Mittlerer Abstand“ in [m] (A = Autobahn, L = Landstraße, FoF = Folgefahrt).

	A_FoF		L_FoF	
Feld	\bar{x} =43,5	σ =6,8	\bar{x} =29,7	σ =5,7
Parameterset 1: Min	\bar{x} =49,2	σ =9,5	\bar{x} =30,7	σ =5,5
Parameterset 2: FOV	\bar{x} =51,8	σ =8,6	\bar{x} =31,8	σ =4,8
Parameterset 3: Dyn	\bar{x} =51,9	σ =8,4	\bar{x} =32,3	σ =5,7
Parameterset 4: Max	\bar{x} =50,9	σ =9,1	\bar{x} =30,7	σ =5,8

Der mittlere Abstand bei einer *Folgefahrt* auf der *Autobahn* liegt im Feld niedriger als im Fahrsimulator. Die statistische Überprüfung der Differenzen zwischen Feld und Fahrsimulator zeigt für alle Parametersets Signifikanz und somit keine absolute Validität (LH₁: $t(36) = -3,319$; $p = 0,002$; LH₂: $t(34) = -4,675$; $p = 0,000$; LH₃: $t(35) = -5,286$; $p = 0,000$; LH₄: $t(36) = -3,993$; $p = 0,000$). Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung lässt jedoch keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors erkennen.

Für die *Folgefahrt* auf der *Landstraße* fällt der von den Probanden gewählte mittlere Abstand zum Vorausfahrenden im Feld ebenfalls geringer aus als im Fahrsimulator, wenn auch nicht so deutlich wie auf der Autobahn. Hier ergibt die statistische Überprüfung der Hypothesen LH₁ bis LH₄ für keines der Parametersets einen signifikanten Unterschied des mittleren Abstands mit den Feldergebnissen. Ein Indiz für absolute Validität liegt in diesem Fall vor.

Für den gewählten mittleren Abstand zeigt sich ein eindeutiger Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Validitätsergebnisse (LH₅). Während auf der Autobahn bei einer Folgefahrt im Feld stets signifikant geringere mittlere Abstände eingehalten werden, zeigt sich für die Abstandswahl bei Folgefahrten auf der Landstraße für alle Parametersets ein Indiz für absolute Validität. Ein Einfluss des Parametersets auf die Validitätsergebnisse ist nicht feststellbar.

Minimaler Abstand: (Abbildung 5.5)

Die deskriptiven Ergebnisse der statistisch analysierten Szenarien Folgefahrt Landstraße und Folgefahrt Autobahn finden sich in Tabelle 5.4.

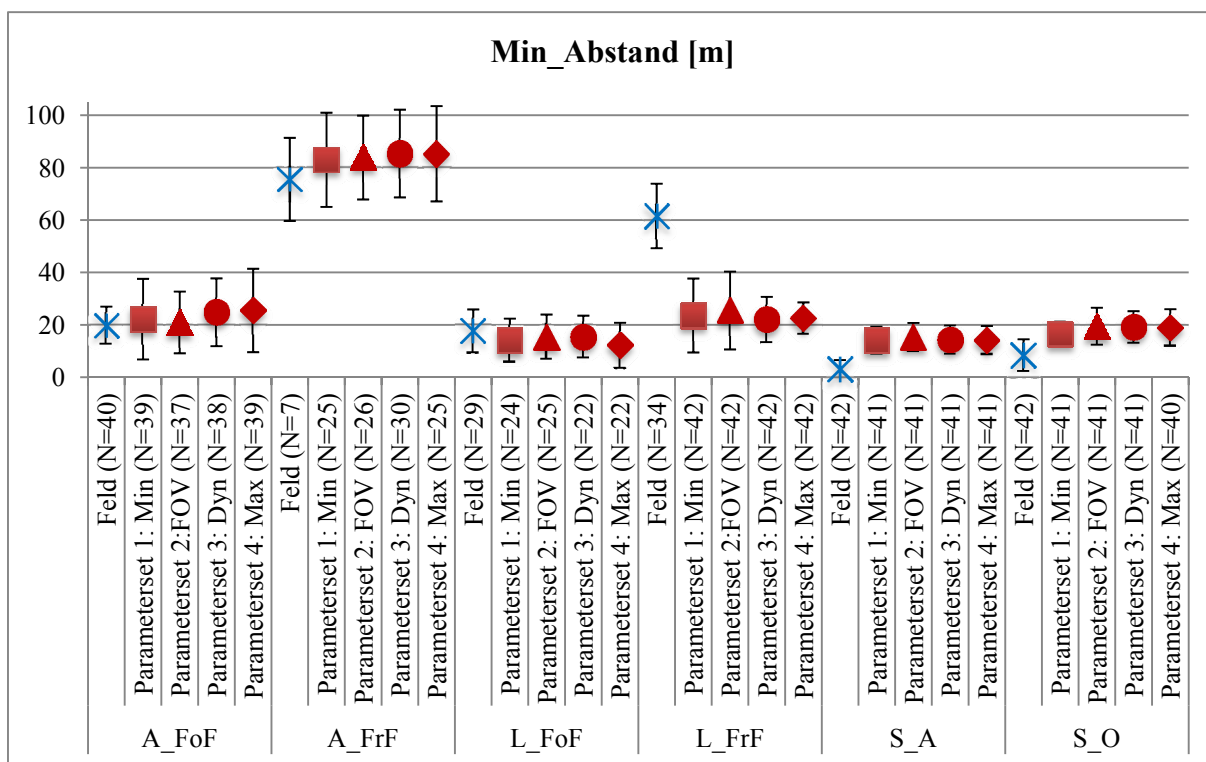


Abbildung 5.5: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Minimaler Abstand" (A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, FrF = Freie Fahrt, FoF = Folgefahrt, A = Abbiegevorgänge, O = Ohne Richtungsänderung).

Tabelle 5.4: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Minimaler Abstand“ in [m] (A = Autobahn, L = Landstraße, FoF = Folgefahrt).

Feld	A_FoF		L_FoF	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Parameterset 1: Min	19,8	7,1	17,7	8,2
Parameterset 2: FOV	22,2	15,4	14,2	8,2
Parameterset 3: Dyn	21,0	11,8	15,5	8,5
Parameterset 4: Max	24,8	12,9	15,5	8,0
	25,5	15,9	12,2	8,6

Betrachtet man sich den minimal eingehaltenen Abstand der Probanden auf Autobahn und Landstraße fällt auf, dass dieser bei der *Folgefahrt Landstraße* im Feld höher ausfällt als in den vier Simulatorfahrten. Eine statistische Überprüfung dieser Differenz zwischen Feld und Fahrsimulator zeigt für Parameterset 1 bis 3 keine Signifikanz und somit ein Indiz für absolute Validität. Parameterset 4 hingegen unterscheidet sich signifikant von den Feldergebnissen ($z = -1,982$; $p = 0,048$).

Bei der *Folgefahrt* auf der *Autobahn* hingegen fällt das Ergebnis des minimalen Abstands vergleichbar zum mittleren Abstand aus. Der minimal gewählte Sicherheitsabstand liegt im Feld unter dem in simulierter Umgebung. Hierbei fällt die besonders hohe Standardabweichung in den Fahrsimulatorfahrten auf. Ein t-Test zeigt, dass der Unterschied zwischen Feld und Parameterset 1 bzw. 2 nicht signifikant ausfällt und somit absolute Validität indiziert wird. Zwischen der realen Untersuchungsumgebung und Parameterset 3 bzw. 4 ergibt sich hingegen ein signifikanter Unterschied des minimal eingehaltenen Abstands ($LH_3: z = -2,561$; $p = 0,010$; $LH_4: z = -2,120$; $p = 0,034$).

Für den minimalen Abstand zeigt sich sowohl ein Einfluss des Untersuchungsszenarios (LH_5) als auch ein Einfluss der Gestaltungsparameter auf die Validitätsergebnisse. So weisen bei einer Folgefahrt auf der Autobahn nur Parameterset 3 und 4 signifikante Abweichungen gegenüber dem Feld auf, wobei in simulierter Umgebung ein größerer minimaler Abstand eingehalten wird. Bei der Folgefahrt auf der Landstraße hingegen wird nur der Vergleich des minimalen Abstands zwischen Realfahrt und Parameterset 4 signifikant. Hier ist im Simulator ein geringerer minimaler Abstand zu verzeichnen.

Mittlere TTC: (Abbildung 5.6)

Die Betrachtung der Kennwerte mittlere TTC und minimale TTC erfolgt, analog zum Abstand, nur für die Folgefahrten auf Landstraße und Autobahn. Die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Szenarien finden sich zusammengefasst in Tabelle 5.5.

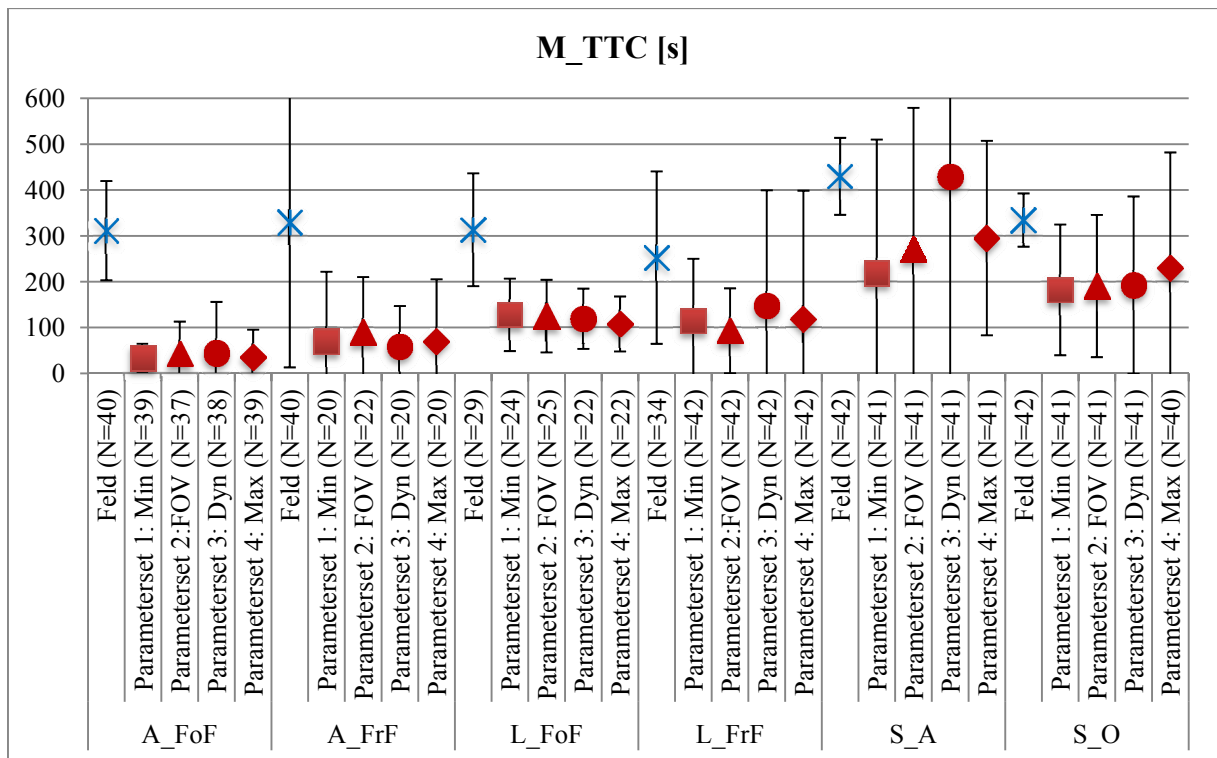


Abbildung 5.6: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Mittlere TTC" (A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, FrF = Freie Fahrt, FoF = Folgefahrt, A = Abbiegevorgänge, O = Ohne Richtungsänderung).

Tabelle 5.5: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Mittlere TTC“ in [s] (A = Autobahn, L = Landstraße, FoF = Folgefahrt).

	A_FoF		L_FoF	
Feld	$\bar{x} = 311,3$	$\sigma = 108,3$	$\bar{x} = 313,3$	$\sigma = 123,1$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 33,2$	$\sigma = 30,5$	$\bar{x} = 127,7$	$\sigma = 79,0$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 42,6$	$\sigma = 70,4$	$\bar{x} = 124,9$	$\sigma = 79,2$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 44,1$	$\sigma = 111,9$	$\bar{x} = 119,2$	$\sigma = 65,8$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 34,9$	$\sigma = 60,5$	$\bar{x} = 107,8$	$\sigma = 60,0$

Die mittlere TTC im Szenario *Autobahn Folgefahrt* liegt im Feld deutlich über den Werten im Fahr Simulator. Auch hier fällt die hohe Standardabweichung der Kennwerte insbesondere im Feld auf. Da der mittlere Abstand im Feld kleiner ausfällt als im Fahr Simulator, deckt sich diese Grundtendenz mit den TTC-Ergebnissen. Die relative Geschwindigkeit zwischen dem Vorausfahrenden und dem Egofahrzeug muss jedoch im Feld auch deutlich größer sein als im Fahr Simulator, um derart große Abweichungen der TTC zu erzielen. Eine statistische Überprüfung zeigt für alle Parametersets eine signifikante Abweichung zum Feld und somit keine absolute Validität (LH₁: $z = -5,288$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -5,110$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -4,666$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -5,212$; $p = 0,000$). Ein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors (LH₅) kann bei der Varianzanalyse nicht nachgewiesen werden.

Auch für das Szenario *Landstraße Folgefahrt* ergibt sich im Feld eine deutlich höhere mittlere TTC als im Simulator, wobei die Differenz hier nicht so groß ausfällt wie auf der Autobahn. Dennoch erweist sich der Unterschied für alle Parametersets als signifikant (LH₁: $z = -3,133$;

$p = 0,002$; LH_2 : $z = -3,736$; $p = 0,000$; LH_3 : $z = -3,058$; $p = 0,002$; LH_4 : $z = -3,462$; $p = 0,001$). Der Einfluss des Messwiederholungsfaktors im Rahmen der Überprüfung von LH_5 weist keine Signifikanz auf.

Für die mittlere TTC zeigt sich für alle betrachteten Parametersets und Szenarien (Autobahn Folgefahrt bzw. Landstraße Folgefahrt) ein signifikanter Unterschied zu den Felddaten. Es lässt sich somit kein Einfluss des Szenarios (LH_5) oder Parameterstes auf die Validitätsergebnisse erkennen. Auffällig sind hier die enorm großen Standardabweichungen in den Daten, die ggf. einen Einfluss auf das Ergebnis haben können.

Minimale TTC: (Abbildung 5.7)

Auch für die minimale TTC liegen die Werte im Feld bei der Folgefahrt auf Autobahn und Landstraße über denen im Fahrsimulator, jedoch fällt der Unterschied nicht so gravierend aus wie bei der mittleren TTC. Die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen finden sich in Tabelle 5.6.

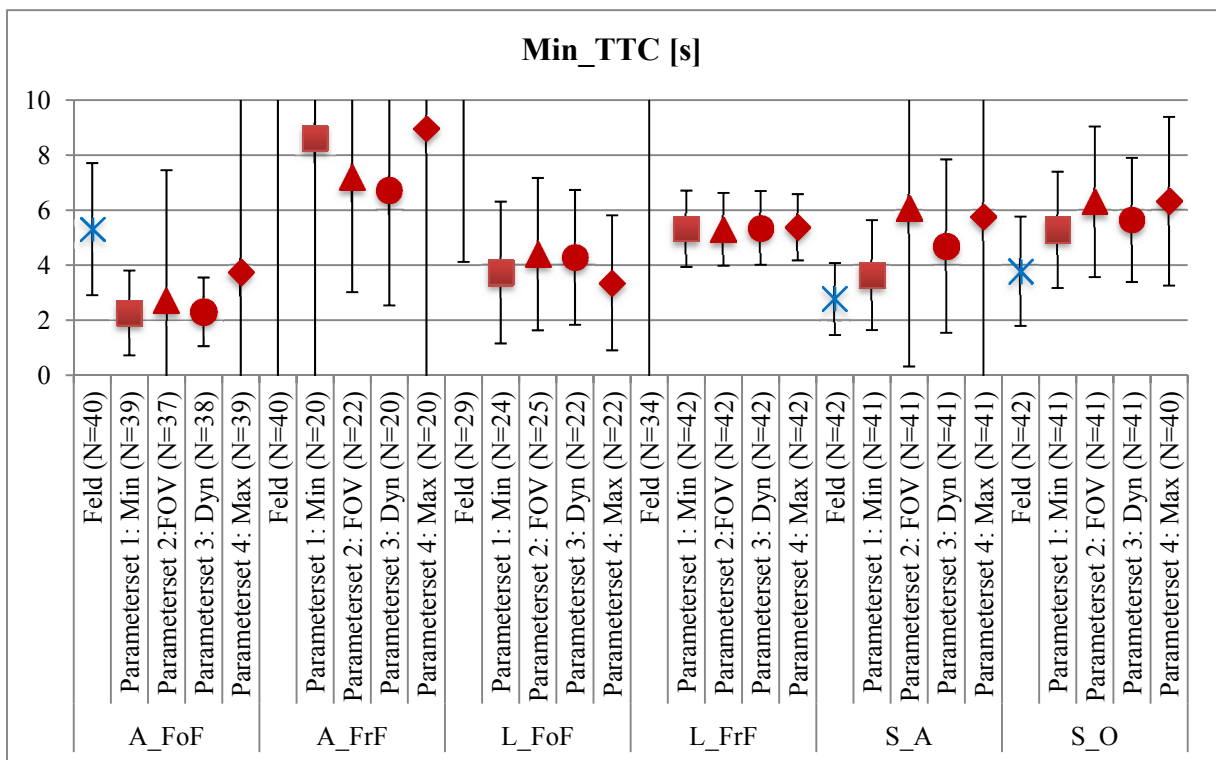


Abbildung 5.7: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts "Minimale TTC" (A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, FrF = Freie Fahrt, FoF = Folgefahrt, A = Abbiegevorgänge, O = Ohne Richtungsänderung).

Tabelle 5.6: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Minimale TTC“ in [s] (A = Autobahn, L = Landstraße, FoF = Folgefahrt).

	A_FoF		L_FoF	
Feld	$\bar{x} = 5,3$	$\sigma = 2,4$	$\bar{x} = 10,7$	$\sigma = 6,6$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 2,3$	$\sigma = 1,5$	$\bar{x} = 3,7$	$\sigma = 2,6$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 2,7$	$\sigma = 4,7$	$\bar{x} = 4,4$	$\sigma = 2,8$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 2,3$	$\sigma = 1,2$	$\bar{x} = 4,3$	$\sigma = 2,4$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 3,7$	$\sigma = 8,2$	$\bar{x} = 3,4$	$\sigma = 2,4$

Für das Szenario *Autobahn Folgefahrt* liegt die minimale TTC im Feld über den Werten im Fahrsimulator. Die statistische Überprüfung zeigt signifikante Unterschiede zwischen Feld und Simulator für alle Parametersets (LH₁: $z = -4,941$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -4,570$; $p = 0,000$; LH₃: $t(35) = 6,783$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -3,990$; $p = 0,000$); es liegt keine absolute Validität vor. Die Betrachtung von LH₅ belegt zudem, dass es keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors gibt.

Bei der *Folgefahrt* auf *Landstraße* zeigt sich eine noch größere Abweichung der minimalen TTC zwischen Feld und den Parametersets im Fahrsimulator. Auch hier ist der Unterschied zwischen beiden Untersuchungsumgebungen durchgängig signifikant, was zur Ablehnung von absoluter Validität führt (LH₁: $z = -3,068$; $p = 0,002$; LH₂: $t(20) = 4,907$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -2,978$; $p = 0,003$; LH₄: $z = -3,549$; $p = 0,000$). Es kann kein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors im Rahmen der Varianzanalyse nachgewiesen werden.

Ebenso wie bei der Mittelwertsbetrachtung zeigt sich auch bei Betrachtung des Minimalwerts der TTC weder ein Einfluss des Untersuchungsszenarios (LH₅) noch des Parametersets.

Standardabweichung Gaspedalstellung, Lenkradwinkel, Gierrate:

Die weiteren Kennwerte der Standardabweichung Gaspedalstellung, Lenkradwinkel und Gierrate sind hinsichtlich ihrer Validitätserkenntnisse weniger aussagekräftig, da im vorliegenden Untersuchungskonzept keine vollständige physikalische Validität zwischen den Fahrdynamikcharakteristika des Fahrsimulators und denen des Realfahrzeugs vorliegt. Entsprechend schwierig ist die Übertragung der Ergebnisse zwischen beiden Untersuchungsumgebungen, da bspw. bei der Gaspedalstellung unterschiedliche physikalische Pedalerverhalten und ggf. verschiedene Rollwiderstände zum Tragen kommen. Der Vollständigkeit halber werden die Erkenntnisse dieser Kennwerte bzgl. Validität jedoch im Anhang der Arbeit, analog zu den bisherigen Kennwerten, ausgeführt, da ein Erkenntnisgewinn insoweit erzielt wird, als dass die Bedeutung einer physikalischen Abstimmung zwischen dem zu simulierenden Fahrzeug und den Fahrsimulatorcharakteristika wichtig ist, sofern entsprechende Kennwerte valide abgebildet werden sollen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wird im Folgenden gegeben.

Dass sich die Standardabweichung der Gaspedalstellung über alle Untersuchungsszenarien und alle Parametersets hinweg als nicht signifikant herausstellt, liegt nach obigen Ausführungen nahe.

Für die Standardabweichung des Lenkradwinkels ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die Gaspedalposition. Weder hinsichtlich verschiedener Untersuchungsszenarien noch hinsichtlich verschiedener Parametersets ergeben sich Unterschiede in der Validitätsaussage; alle Vergleiche zwischen Feld und Fahrsimulator unterscheiden sich signifikant und sind demnach nicht valide. Für nahezu alle Fahrten liegt dabei die Standardabweichung der Realfahrt signifikant unter der im Fahrsimulator; nur vereinzelt zeigen sich gegenläufige Signifikanzen. Die Querkontrolle im Fahrsimulator erweist sich dementsprechend als deutlich schwieriger. Gründe hierfür können zum einen das fehlende Bewegungsfeedback im Falle von Parameterset 1 und 2 sein, zum anderen kann auch ein ggf. zu undifferenziert ausgelegtes Force-Feedback die Lenkung im Fahrsimulator erschweren. Diese Schwachstelle des Force-Feedback kann auch Erklärung dafür sein, wieso kein für die Validität hinreichender positiver Einfluss eines erweiterten FOV auf die Querregelung zu vermerken ist, wie er theoretisch hergeleitet wurde. Hier überwiegt die erschwerte Querkontrolle den Zugewinn an lateralen Positionsinformationen durch Sichtwinkelerweiterung.

Die Standardabweichung der Gierrate zeigt keinen Unterschied zwischen verschiedenen Parametersets. So erweist sich ein Vergleich zwischen Feld und allen vier Parametersets Innerorts im Falle keiner Richtungsänderung als absolut valide, während alle anderen Szenarien parametersetübergreifend signifikante Unterschiede zwischen Feld und Fahrsimulator aufweisen. Es lässt sich demnach ein Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Validitätsergebnisse erkennen. Dabei fällt die Standardabweichung im Feld meist geringer aus als im Fahrsimulator, was durch höhere Reibungswerte in realer Umgebung erklärt werden kann.

Zusammenfassung:

Um die vorgestellten Ergebnisse noch einmal übersichtlich und mit direktem Bezug zur jeweiligen Untersuchungshypothese darzustellen, findet sich in Tabelle 5.7 eine Zusammenfassung. Dabei sind signifikant ausfallende Ergebnisse mit einem entsprechenden Symbol (*) gekennzeichnet. In Klammern wird zudem das Verhältnis angegeben, in dem die jeweiligen Ergebnisse aus der realen und simulierten Untersuchungsumgebung zueinander stehen (<, =, >).

Wie die Ergebnisübersicht zeigt, erweisen sich die mittlere Geschwindigkeit bei einer Freien Fahrt auf der Autobahn, der mittlere Abstand bei einer Folgefahrt auf einer Landstraße sowie die Standardabweichung der Gierrate bei einem innerstädtischen Szenario ohne Abbiegevorgänge als durchweg valide über alle Parametersets. Auf der anderen Seite gibt es Kennwerte, die für kein Parameterset im Fahrsimulator identisch bzw. nicht signifikant unter-

schiedlich zum Feld ausfallen. Hierzu zählen der Mittelwert und das Minimum der TTC sowie die Standardabweichung der Gaspedalstellung und des Lenkradwinkels. Diese Fahrdynamikkennwerte lassen sich folglich nicht mit einer der untersuchten Fahrsimulatorkonfigurationen valide erheben. Neben diesen Erkenntnissen zur fehlenden Validität zeigt sich jedoch für andere Kennwerte, wie beispielsweise die maximale Geschwindigkeit bei einer Freien Fahrt auf der Autobahn, der angenommene positive Einfluss einer Gestaltungsparameter-Erweiterung auf die Validität. Demgegenüber finden sich auch negative Zusammenhänge zwischen einer Ausweitung eines Gestaltungsparameters und deren Auswirkung auf die Validität. So weisen die einfacher ausgestatteten Parametersets im Falle des minimalen Abstands bei Folgefahrten auf Autobahn oder Landstraße Validität auf, während sich mit zunehmender Ausweitung der Fahrsimulatorkonfiguration ein signifikanter Unterschied zur realen Umgebung einstellt.

Auch der zweite betrachtete Einflussfaktor, das Untersuchungsszenario, zeigt Auswirkungen auf die Übertragbarkeit einzelner Kennwerte zwischen realer und simulierter Umgebung. So ist die mittlere Geschwindigkeit bei einer Freien Fahrt auf der Autobahn über alle Parametersets valide, während sich auf der Landstraße ein konträres Ergebnis feststellen lässt.

Tabelle 5.7: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesen und statistischen Ergebnisse für die Fahrdynamikkennwerte (die mit Sternchen(*) markierten und grün hinterlegten Kästchen zeigen einen auf einem 5%-Niveau signifikanten Unterschied zwischen Feld und Fahrimulator und somit kein Indiz für absolute Validität; das Verhältnis der Ergebnisse aus Feld und Fahrimulator zueinander wird in Klammern angegeben (<, =, >); A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, FrF = Freie Fahrt, FoF = Folgefahrt, A = Abbiegevorgänge, O = Ohne Richtungsänderung).

Kennwerte	Szenario	LH ₁		LH ₂		LH ₃		LH ₄	
		Feld - Set 1		Feld - Set 2		Feld - Set 3		Feld - Set 4	
M_Geschwindigkeit	A_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(>)
	L_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	*
	S_A	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(>)
	S_O	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	*
	S_O	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
Max_Geschwindigkeit	A_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$		$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	
	L_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
	L_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	*
M_Abstand	A_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	*
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
Min_Abstand	A_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$		$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$		$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	*
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	*
M_TTC	A_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	*	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	*
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(>)

Kennwerte	Szenario	LH ₁		LH ₂		LH ₃		LH ₄	
		Feld - Set 1		Feld - Set 2		Feld - Set 3		Feld - Set 4	
Min_TTC	A_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (<)
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (>)
SD_Gaspedal	A_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	-	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	-	* (<)
	L_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	-	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	-	* (<)
	A_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	-	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	-	* (<)
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	-	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	-	* (<)
SD_Lenkradwinkel	A_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (>)
	L_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (<)
	A_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (>)
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (<)
	S_A	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (<)
	S_O	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (<)
SD_Gierrate	A_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	-	* (>)	-	* (>)
	L_FrF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	-	* (>)	-	* (>)
	A_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	-	* (>)	-	* (<)
	L_FoF	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	-	* (<)	-	* (<)
	S_A	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	-	* (>)	-	* (<)
	S_O	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	-	* (>)	-	* (<)

5.3 Fahrerverhaltenskennwerte

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse des Blickverhaltens der Probanden während der Versuchsfahrten eingegangen. Hier werden zwei Kennwerte für ausgewählte AOIs betrachtet: relative Fixationsdauer und relative Fixationshäufigkeit. Im Unterschied zu den Fahrdynamikkennwerten werden hier nicht einzelne Szenarien, sondern jeweils die komplette Szenerie betrachtet, da größtenteils keine Unterschiede im Blickverhalten zwischen den Szenarien erwartet werden. In Ausnahmefällen findet eine feinere Aufgliederung und Analyse der Daten getrennt nach Freier Fahrt und Folgefahrt statt, um diese Annahme zu bestätigen.

Relative Fixationsdauer AOI „Straße“: (Abbildung 5.8)

Auf den ersten Blick liegen die relativen Fixationsdauern auf das AOI „Straße“ zwischen beiden Untersuchungsumgebungen relativ nahe beieinander. Die Mittelwerte und Standardabweichungen für alle drei Szenarien sind Tabelle 5.8 zu entnehmen.

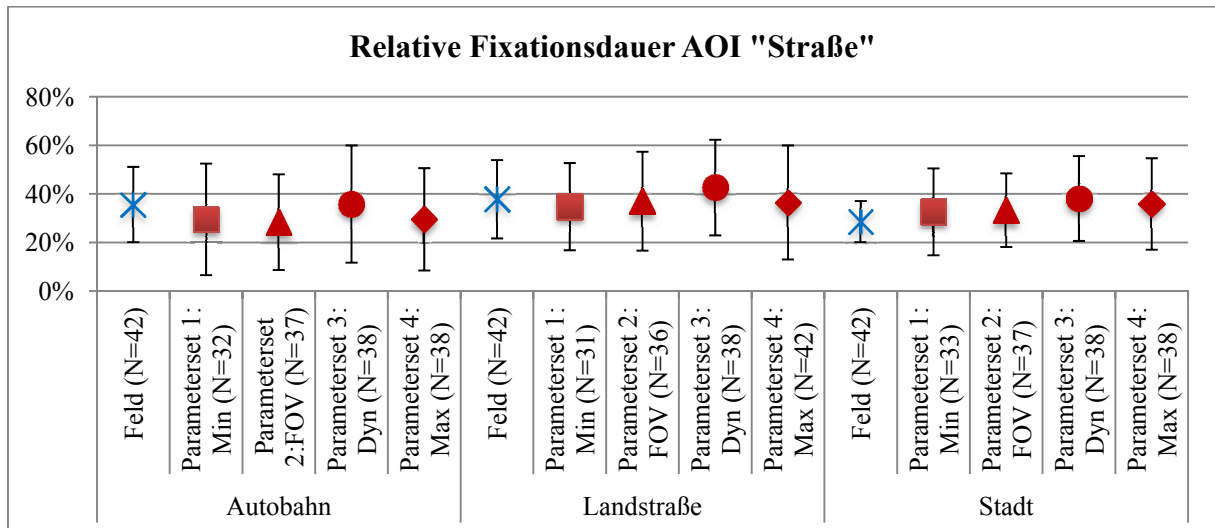


Abbildung 5.8: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Straße“.

Tabelle 5.8: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Straße“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 35,6$	$\sigma = 15,5$	$\bar{x} = 37,8$	$\sigma = 16,1$	$\bar{x} = 28,6$	$\sigma = 8,5$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 29,5$	$\sigma = 23,0$	$\bar{x} = 34,7$	$\sigma = 18,0$	$\bar{x} = 32,6$	$\sigma = 17,9$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 28,3$	$\sigma = 19,7$	$\bar{x} = 37,0$	$\sigma = 20,4$	$\bar{x} = 33,3$	$\sigma = 15,2$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 35,8$	$\sigma = 24,2$	$\bar{x} = 42,6$	$\sigma = 19,7$	$\bar{x} = 38,1$	$\sigma = 17,5$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 29,5$	$\sigma = 21,1$	$\bar{x} = 36,5$	$\sigma = 23,5$	$\bar{x} = 35,8$	$\sigma = 18,8$

Für die Szenerie *Autobahn* ergibt sich dennoch zwischen Feld und Parameterset 2 ein signifikanter Unterschied, wobei die Straße im Feld länger betrachtet wird ($t(36) = 2,074$; $p = 0,045$). Für die anderen Fahr Simulatorfahrten zeigen sich keine signifikanten Abweichungen zur Realfahrt.

Die Ergebnisse der relativen Fixationsdauer auf die Straße unterscheiden sich für die *Landstraße* zwischen Feld und Fahr Simulator für keine der Fahrten signifikant.

Für die *Stadtfahrt* fallen die Ergebnisse jedoch anders aus. Hier tritt nur zwischen Parameterset 1 und der Realfahrt kein signifikanter Unterschied auf. Für alle anderen Fahr Simulatorfahrten hingegen liegt die relative Fixationsdauer im Feld signifikant unter der in simulierter Umgebung (LH₂: $t(36) = -2,035$; $p = 0,049$; LH₃: $t(37) = -3,336$; $p = 0,002$; LH₄: $t(37) = -2,469$; $p = 0,018$).

Die relative Fixationsdauer auf die Straße unterscheidet sich für die Landstraße zwischen Fahr Simulator und Feld nur gering. Für die Autobahn bzw. Stadt hingegen unterscheiden sich jeweils ein bzw. drei der vier Parametersets signifikant von der Realfahrt. Es zeigt sich dem-

nach sowohl ein Einfluss des Untersuchungsszenarios (LH_S) als auch des Parametersets auf die Validitätsergebnisse.

Relative Fixationshäufigkeit AOI „Straße“: (Abbildung 5.9)

Die relativen Fixationshäufigkeiten auf die Straße deuten bei einer ersten Betrachtung für keine der Szenarien auf einen signifikanten Unterschied zwischen realer und simulierter Umgebung hin. Die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen können Tabelle 5.9 entnommen werden.

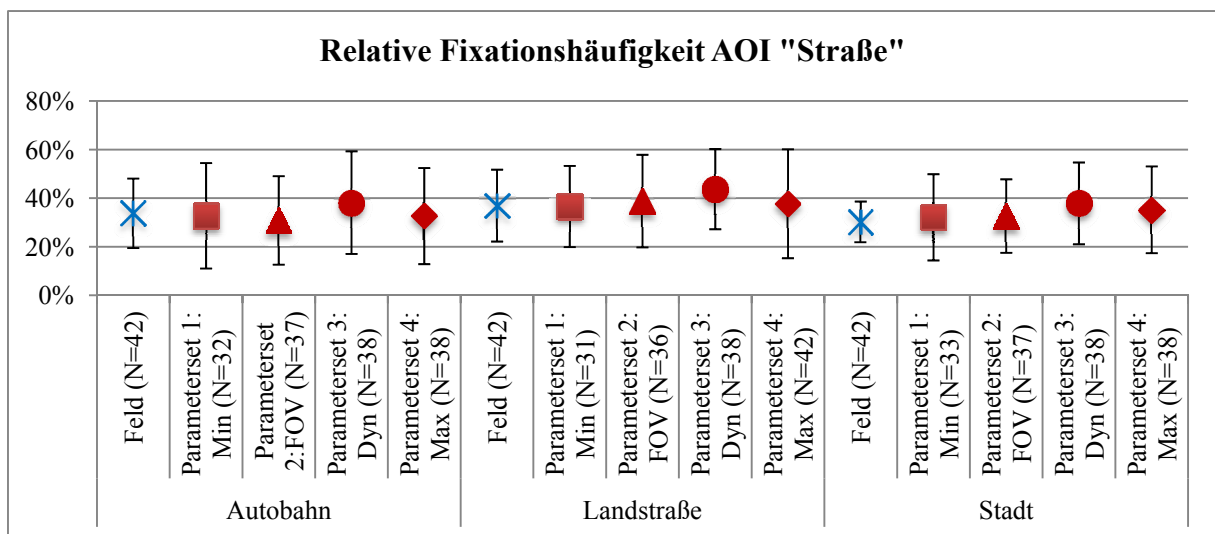


Abbildung 5.9: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Straße“.

Tabelle 5.9: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Straße“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 33,8$	$\sigma = 14,3$	$\bar{x} = 37,0$	$\sigma = 14,8$	$\bar{x} = 30,2$	$\sigma = 8,5$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 32,8$	$\sigma = 21,7$	$\bar{x} = 36,6$	$\sigma = 16,7$	$\bar{x} = 32,2$	$\sigma = 17,8$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 30,9$	$\sigma = 18,2$	$\bar{x} = 38,8$	$\sigma = 19,1$	$\bar{x} = 32,7$	$\sigma = 15,1$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 38,2$	$\sigma = 21,1$	$\bar{x} = 43,8$	$\sigma = 16,5$	$\bar{x} = 37,9$	$\sigma = 16,9$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 32,7$	$\sigma = 19,8$	$\bar{x} = 37,7$	$\sigma = 22,4$	$\bar{x} = 35,2$	$\sigma = 17,9$

Für die *Autobahn* bestätigt sich dieser Eindruck auch bei einer statistischen Überprüfung. Der Kennwert fällt im Feld nur etwas unterschiedlich aus als im Fahrsimulator; es zeigt sich jedoch keine Signifikanz des Unterschieds.

Bei der Szenerie *Landstraße* ergibt sich ein ähnliches Bild. Hier unterscheidet sich die Feldfahrt nur von Parameterset 3 signifikant ($t(37) = -2,059$; $p = 0,047$), während die anderen drei Fahrsimulatorfahrten vergleichbare Werte mit der Realfahrt aufweisen.

Auch *Innerorts* unterscheidet sich nur Parameterset 3 signifikant von den deutlich geringer ausfallenden Werten im Feld ($t(37) = -2,895$; $p = 0,006$). Die anderen drei Parametersets hingegen weisen keine großen, signifikanten Abweichungen von der realen Umgebung auf.

Während auf der Autobahn für alle vier Fahr Simulatorfahrten ein Indiz für absolute Validität der relativen Fixationshäufigkeit des AOI „Straße“ identifiziert werden kann, ergibt sich sowohl für die Landstraße als auch die Stadt ein signifikanter Unterschied zwischen Feld und Parameterset 3. Es gibt demnach sowohl einen Einfluss des Untersuchungsszenarios (LH₅) als auch verschiedener Parametersets auf die Validitätsergebnisse.

Relative Fixationsdauer AOI „Umgebung“: (Abbildung 5.10)

Die relative Fixationsdauer auf die Umgebung fällt für die Szenerie Autobahn im Feld deutlich geringer aus als im Fahr Simulator. Für die beiden anderen Szenerien lässt sich keine derart große Abweichung erkennen. Die deskriptiven Daten finden sich in Tabelle 5.10.

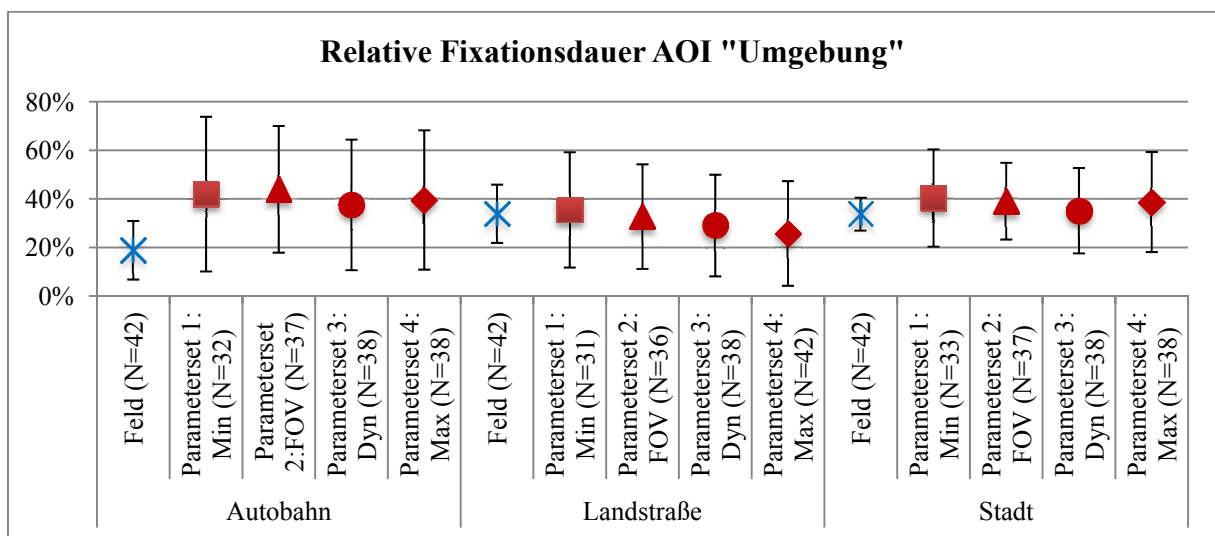


Abbildung 5.10: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Umgebung“.

Tabelle 5.10: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Umgebung“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 18,9$	$\sigma = 12,0$	$\bar{x} = 33,9$	$\sigma = 12,0$	$\bar{x} = 33,8$	$\sigma = 6,7$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 42,0$	$\sigma = 31,9$	$\bar{x} = 35,5$	$\sigma = 23,7$	$\bar{x} = 40,4$	$\sigma = 20,0$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 44,0$	$\sigma = 26,1$	$\bar{x} = 32,7$	$\sigma = 21,5$	$\bar{x} = 39,1$	$\sigma = 15,8$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 37,6$	$\sigma = 26,9$	$\bar{x} = 29,1$	$\sigma = 20,9$	$\bar{x} = 35,2$	$\sigma = 17,6$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 39,6$	$\sigma = 28,7$	$\bar{x} = 25,8$	$\sigma = 21,5$	$\bar{x} = 38,8$	$\sigma = 20,6$

Auf der *Autobahn* wird das AOI „Umgebung“ bei der Realfahrt signifikant weniger lang betrachtet als im Fahr Simulator (LH₁: $z = -2,936$; $p = 0,003$; LH₂: $z = -4,352$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -2,879$; $p = 0,004$; LH₄: $z = -3,662$; $p = 0,000$). Die Varianzanalyse mit Messwiederholung in Analyseschritt 2 (LH₅) kommt zu dem Ergebnis, dass der Messwiederholungsfaktor keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Kein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Kennwerts ergibt sich hingegen auf der *Landstraße* zwischen der Feldfahrt und drei der vier Fahr Simulatorfahrten. Parameterset 4 liegt

hingegen signifikant unter den Ergebnissen der relativen Fixationsdauer im Feld (LH₄: $t(41) = 2,533$; $p = 0,015$).

Innerorts zeigt sich ein vergleichbares Bild mit der Landstraße; hier liegt der signifikante Unterschied jedoch zwischen Feld und Parameterset 1 (LH₁: $t(32) = -2,123$; $p = 0,042$), während sich Parameterset 2, Parameterset 3 und Parameterset 4 nicht signifikant von der Realfahrt unterscheiden.

Die relative Fixationsdauer der Umgebung weicht auf der Autobahn in allen vier Fahrsimulatorfahrten signifikant vom Feld ab, wobei die Umgebung im Fahrsimulator stets länger betrachtet wird. Dies kann zum einen am Neuheitsgrad einer simulierten Umgebung für Probanden liegen, der das Interesse auf Landschaftsdarstellungen lenkt. Ein weiterer möglicher Erklärungsgrund kann in der unterschiedlichen Verkehrsdichte in beiden Untersuchungsumgebungen liegen. Im Fahrsimulator ist der Verkehr auf der Autobahn nicht so dicht wie in realer Umgebung, sodass die Probanden hier mehr Zeit haben, die Umgebung zu betrachten. Um diese Vermutung zu überprüfen, wird in einem weiteren Schritt die relative Fixationsdauer auf das AOI „Umgebung“ getrennt für die Szenarien Freie Fahrt und Folgefahrt auf der Autobahn ausgewertet (Abbildung 5.11).

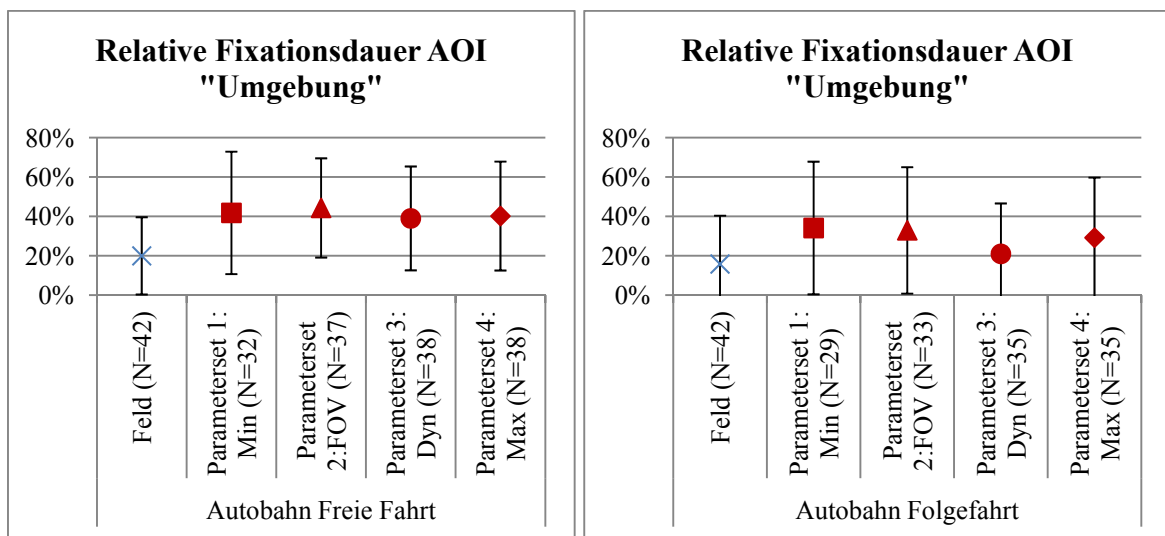


Abbildung 5.11: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Umgebung“, getrennt nach Freier Fahrt (links) und Folgefahrt (rechts) auf der Autobahn.

Bei der Freien Fahrt zeigen sich wiederum die bereits bei der Gesamtzeneriebetrachtung identifizierten signifikanten Unterschiede zwischen Feld und Fahrsimulator, wobei im Feld kürzer auf die Umgebung geschaut wird (LH₁: $z = -2,599$; $p = 0,009$; LH₂: $z = -4,202$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -2,951$; $p = 0,003$; LH₄: $z = -3,401$; $p = 0,001$). Ein vergleichbares Bild ergibt sich auch für die Folgefahrt, bei der drei der vier Fahrsimulatorfahrten signifikant von der Realfahrt abweichen (LH₁: $z = -2,000$; $p = 0,045$; LH₂: $z = -2,832$; $p = 0,005$; LH₄: $z = -2,162$; $p = 0,031$). Lediglich Parameterset 3 weist keine signifikante Differenz zur realen Umgebung auf. Die vorangehenden Ausführungen legen nahe, dass die unterschiedliche Verkehrsdichte in beiden Untersuchungen, die sich überwiegend auf das Szenario Folgefahrt

auswirkt, keinen Einfluss auf die Validitätsergebnisse des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Umgebung“ nehmen, da sich die Ergebnisse nicht deutlich von denen der Freien Fahrt unterscheiden.

Auf der Landstraße ergibt ein Vergleich zwischen Realfahrt und Parameterset 1, 2 sowie 3 keinen signifikanten Unterschied, während verglichen mit Parameterset 4 im Feld signifikant länger auf die Umgebung geschaut wird. Es gibt demnach einen Einfluss des Parametersets auf die Validitätsergebnisse. Innerorts weicht Parameterset 1 signifikant von der realen Untersuchungsumgebung ab, während die anderen drei Fahr Simulatorfahrten ein Indiz für absolute Validität liefern. Die Ergebnisse zwischen den verschiedenen Untersuchungsszenarien unterscheiden sich, sodass auch von dieser Variable ein Einfluss bestätigt werden kann (LH₅).

Relative Fixationshäufigkeit AOI „Umgebung“: (Abbildung 5.12)

Auch hinsichtlich der relativen Fixationshäufigkeit auf das AOI „Umgebung“ zeichnen sich deutliche Unterschiede zwischen Feld und Fahr Simulator für die Autobahn und die Stadt ab. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Szenarien sind in Tabelle 5.11 dargestellt.

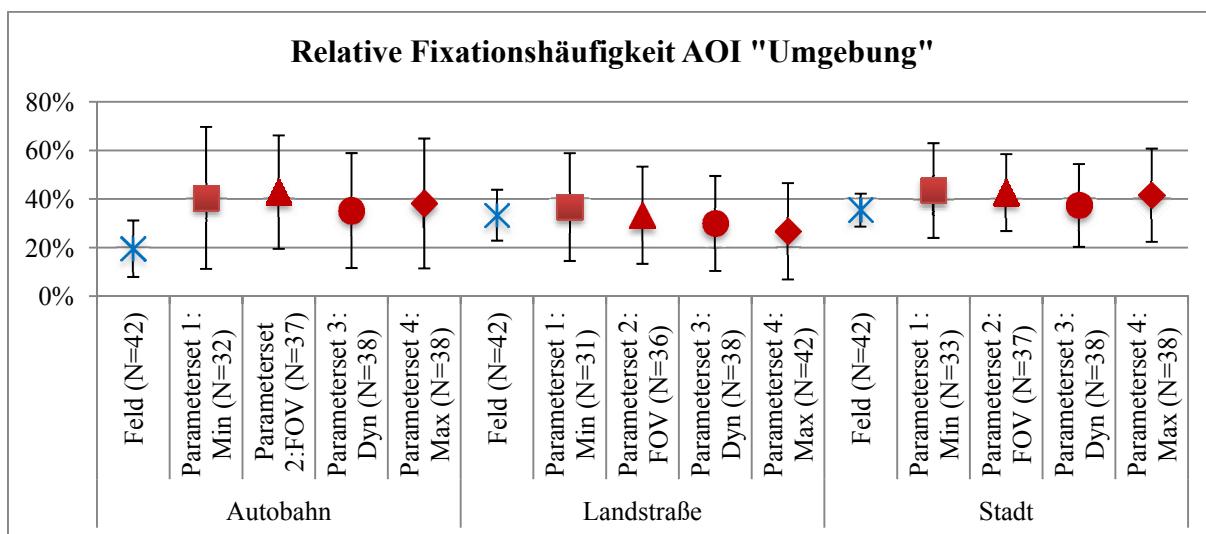


Abbildung 5.12: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Umgebung“.

Tabelle 5.11: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Umgebung“ in [%].

	Autobahn	Landstraße	Stadt
Feld	$\bar{x} = 19,6$ $\sigma = 11,6$	$\bar{x} = 33,4$ $\sigma = 10,5$	$\bar{x} = 35,5$ $\sigma = 6,8$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 40,5$ $\sigma = 29,2$	$\bar{x} = 36,7$ $\sigma = 22,2$	$\bar{x} = 43,5$ $\sigma = 19,5$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 42,9$ $\sigma = 20,0$	$\bar{x} = 33,4$ $\sigma = 20,0$	$\bar{x} = 42,7$ $\sigma = 15,8$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 35,3$ $\sigma = 19,6$	$\bar{x} = 30,0$ $\sigma = 19,6$	$\bar{x} = 37,4$ $\sigma = 17,1$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 38,2$ $\sigma = 26,7$	$\bar{x} = 26,8$ $\sigma = 19,8$	$\bar{x} = 41,6$ $\sigma = 19,2$

Eine nähere statistische Analyse für die *Autobahn* bestätigt die signifikant niedriger liegenden Werte im Feld gegenüber den Werten im Fahrsimulator (LH₁: $z = -2,992$; $p = 0,003$; LH₂: $z = -4,473$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -2,850$; $p = 0,004$; LH₄: $z = -3,531$; $p = 0,000$). Eine Varianzanalyse zur Überprüfung von LH₅ lässt keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors erkennen.

Auf der *Landstraße* hingegen unterscheiden sich nur Feld und Parameterset 4 signifikant voneinander (LH₄: $t(41) = 2,276$; $p = 0,028$). Die anderen drei Parametersets weisen keine signifikanten Unterschiede zur Realfahrt auf.

Innerorts weist ein Vergleich zwischen Feld und Parameterset 1 (LH₁: $t(32) = -2,661$, $p = 0,012$) sowie Parameterset 2 (LH₂: $t(36) = -2,795$; $p = 0,008$) signifikant niedrigere relative Fixationshäufigkeiten im Feld auf. Für Parameterset 3 wie auch Parameterset 4 ergeben sich keine signifikanten Unterschiede gegenüber der realen Untersuchungsumgebung.

Die relative Fixationshäufigkeit der Umgebung erweist sich auf der Autobahn in der simulierten Umgebung als signifikant größer als im Feld; dies erstreckt sich über alle Parametersets. Für die Landstraße wie auch die Stadt hingegen weisen einzelne Parametersets signifikante Unterschiede zur Realfahrt auf, sodass ein Parametereinfluss auf die Validität zu verbuchen ist. Auch der Einfluss verschiedener Untersuchungsszenarien (LH_s) gilt demnach als belegt. Dabei wird die Umgebung im Fahrsimulator größtenteils häufiger betrachtet, da sie den bereits angesprochenen Neuheitscharakter aufweist und das Gefährdungsrisiko einer Realfahrt nicht gegeben ist.

Analog zur Betrachtung der relativen Fixationsdauer wird auch hier eine getrennte Analyse von Freier Fahrt und Folgefahrt auf der Autobahn durchgeführt (Abbildung 5.13), um zu untersuchen, inwiefern die unterschiedliche Verkehrsdichte zwischen beiden Untersuchungsumgebungen die Validitätsergebnisse beeinflussen.

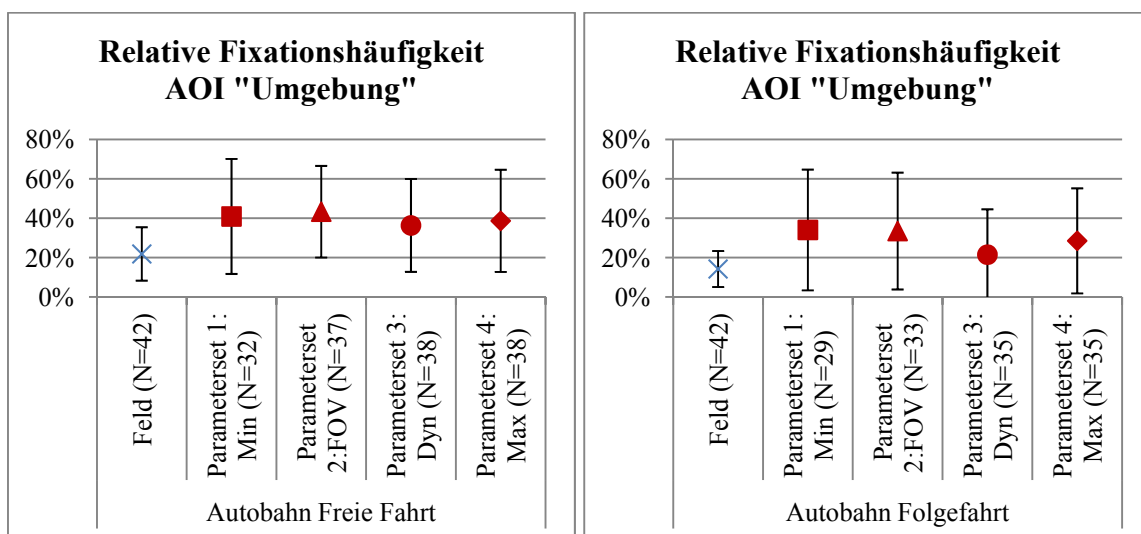


Abbildung 5.13: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Umgebung“, getrennt nach Freier Fahrt (links) und Folgefahrt (rechts) auf der Autobahn.

Die relative Fixationshäufigkeit auf das AOI Umgebung unterscheidet sich auch bei reiner Betrachtung des Szenarios Freie Fahrt zwischen Feld und allen Parametersets signifikant (LH₁: $t(31) = -3,277$; $p = 0,003$; LH₂: $t(36) = -5,668$; $p = 0,000$; LH₃: $t(37) = -3,192$; $p = 0,003$; LH₄: $t(37) = -3,943$; $p = 0,000$). Eine Analyse der Folgefahrt zeigt ein mit den Ergebnissen der relativen Fixationsdauer auf das AOI Umgebung vergleichbares Ergebnis. Drei der vier Parametersets unterscheiden sich signifikant von der Realfahrt (LH₁: $t(28) = -3,383$; $p = 0,002$; LH₂: $t(32) = -3,786$; LH₄: $t(34) = -3,148$; $p = 0,003$). Einzig Parameterset 3 weist keine signifikante Differenz zur realen Umgebung auf. Auch im Falle der relativen Fixationshäufigkeit liegt daher der Schluss nahe, dass die unterschiedliche Verkehrsdichte in beiden Untersuchungen, die sich überwiegend auf das Szenario Folgefahrt auswirkt, keinen Einfluss auf die Validitätsergebnisse nimmt, da sich zwischen Freier Fahrt und Folgefahrt keine großen Unterschiede identifizieren lassen.

Relative Fixationsdauer AOI „Verkehr“: (Abbildung 5.14)

Die Fixationsdauer auf das AOI „Verkehr“ fällt insbesondere auf der Autobahn und in der Stadt im Realen deutlich höher aus als im Fahrsimulator. Die Mittelwerte und Standardabweichungen für alle drei Szenarien sind in Tabelle 5.12 dargestellt.

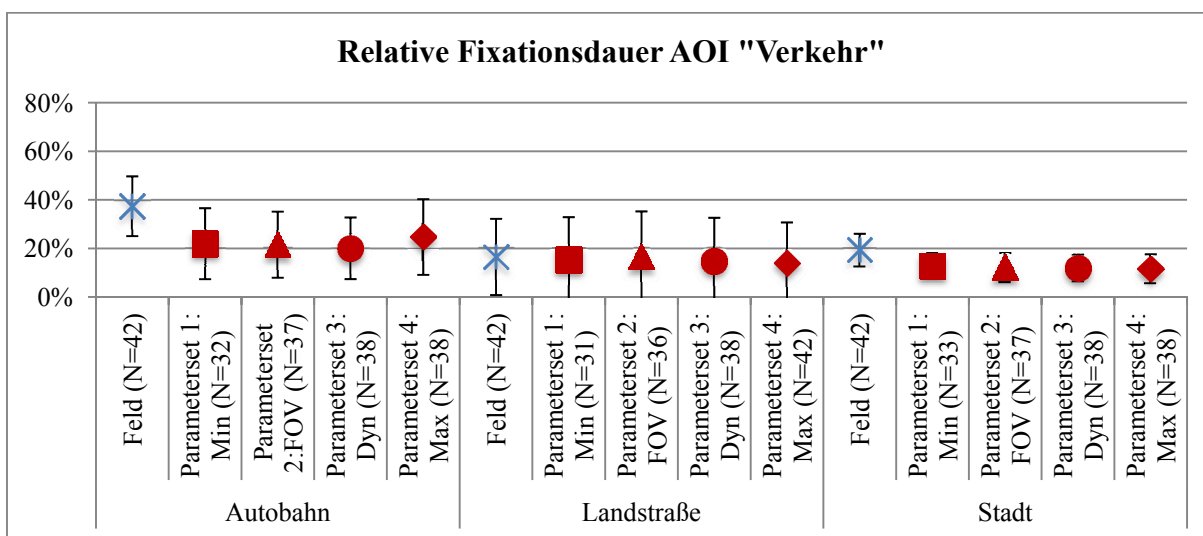


Abbildung 5.14: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Verkehr“.

Tabelle 5.12: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Verkehr“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 37,4$	$\sigma = 12,3$	$\bar{x} = 16,5$	$\sigma = 15,7$	$\bar{x} = 19,5$	$\sigma = 6,6$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 22,0$	$\sigma = 14,6$	$\bar{x} = 15,3$	$\sigma = 17,5$	$\bar{x} = 12,8$	$\sigma = 5,2$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 21,6$	$\sigma = 13,6$	$\bar{x} = 16,5$	$\sigma = 18,8$	$\bar{x} = 12,3$	$\sigma = 5,9$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 20,1$	$\sigma = 12,7$	$\bar{x} = 14,7$	$\sigma = 17,9$	$\bar{x} = 11,7$	$\sigma = 5,5$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 24,7$	$\sigma = 15,6$	$\bar{x} = 14,1$	$\sigma = 16,6$	$\bar{x} = 11,5$	$\sigma = 6,1$

Auf der *Autobahn* liegt die relative Fixationsdauer auf den Verkehr im Feld signifikant über den Werten im Fahrsimulator (LH₁: $t(31) = 5,559$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -4,126$; $p = 0,000$; LH₃: $t(37) = 7,126$; $p = 0,000$; LH₄: $t(37) = 4,141$; $p = 0,000$). Die anschließende Varianzanalyse mit Messwiederholung zur Überprüfung von LH₅ zeigt keine Signifikanz.

Bei der *Landstraße* hingegen fällt die Differenz nicht derart groß aus zwischen beiden Untersuchungsumgebungen. Es zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Feld und den Fahrsimulatorfahrten.

Im *innerstädtischen* Streckenabschnitt ergibt sich wiederum ein mit der Autobahn vergleichbares Bild. Auch hier liegt die relative Fixationsdauer auf das AOI „Verkehr“ im Feld signifikant über der in allen vier Parametersets im Fahrsimulator (LH₁: $t(32) = 4,675$; $p = 0,000$; LH₂: $t(36) = 5,420$; $p = 0,000$; LH₃: $t(37) = 6,219$; $p = 0,000$; LH₄: $t(37) = 6,264$; $p = 0,000$). Analog zur Autobahnbetrachtung ergibt sich auch hier kein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors (LH₅) auf die Ergebnisse.

Auf der Landstraße ergibt sich für alle Parametersets ein Indiz für absolute Validität der relativen Fixationsdauer auf den Verkehr. Für die Autobahn und die Stadt hingegen kann dieses Ergebnis nicht bestätigt werden, sodass es einen Einfluss des Untersuchungsszenarios (LH₅) zu verzeichnen gibt. In diesen beiden Szenarien unterscheiden sich jeweils alle vier Fahrsimulatorfahrten von der Realfahrt, mit signifikant höherer Fixationsdauer des Verkehrs im Feld. Eine Erklärung hierfür kann in der höheren Verkehrsdichte in realer Umgebung gesehen werden. Zudem stufen die Probanden andere Verkehrsteilnehmer im Fahrsimulator ggf. als weniger wichtig ein, da keine reale Gefahr besteht, eine Kollision zu verursachen. Ein Unterschied zwischen den Parametersets kann hinsichtlich der Validitätsergebnisse nicht gezeigt werden.

Ob der vermutete Einfluss der erhöhten Verkehrsdichte in realer Umgebung die Validitätsergebnisse beeinflusst, wird im Folgenden analysiert.

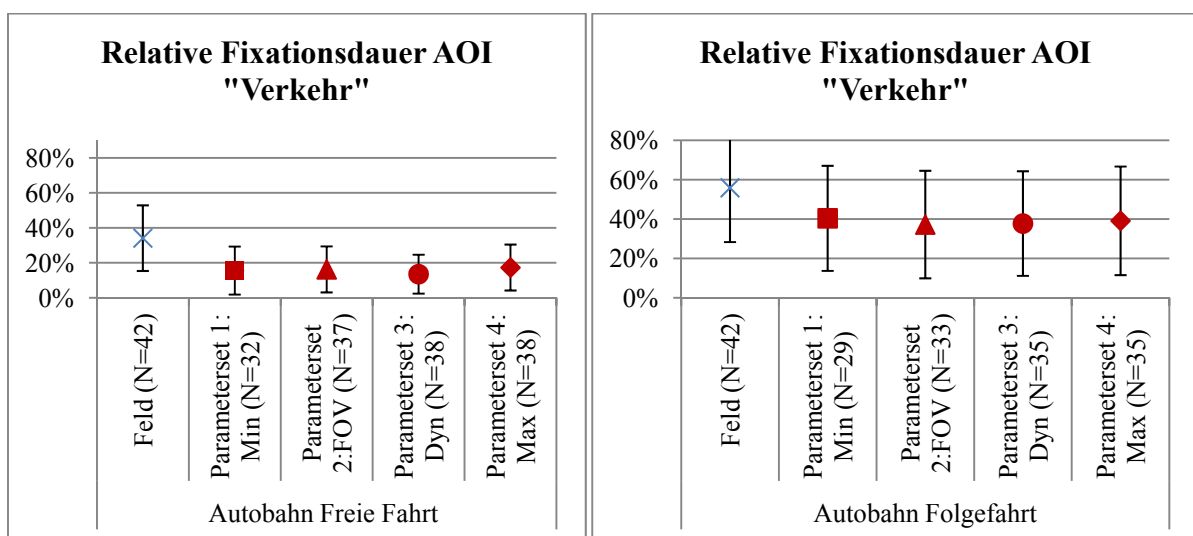


Abbildung 5.15: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Verkehr“, getrennt nach Freier Fahrt (links) und Folgefahrt (rechts) auf der Autobahn.

Zu diesem Zweck wird die Autobahnpassage getrennt nach Freier Fahrt und Folgefahrt ausgewertet (Abbildung 5.15), da sich eine erhöhte Verkehrsdichte primär auf letzteres Szenario auswirkt. Bei Freier Fahrt auf der Autobahn wird das AOI „Verkehr“ in realer Umgebung signifikant länger betrachtet als im Fahr Simulator ($LH_1: t(31) = 4,976; p = 0,000; LH_2: z = -3,613; p = 0,000; LH_3: z = -4,271; p = 0,000; LH_4: t(37) = -4,340; p = 0,000$). Es zeigt sich demnach, dass auch bei einem Szenario, bei dem die Verkehrsdichte keinen starken Einfluss ausübt, signifikante Unterschiede zwischen beiden Umgebungen herrschen und somit keine Beeinflussung der Validitätsergebnisse durch unterschiedliche Verkehrszahlen zu erwarten ist. Auch für die Folgefahrt zeigen sich die bereits in der Gesamtzeneriebetrachtung identifizierten signifikanten Unterschiede zwischen beiden Untersuchungsumgebungen ($LH_1: z = -2,173; p = 0,030; LH_2: t(32) = 3,372; LH_3: t(34) = 3,875; p = 0,000; LH_4: t(34) = 3,654; p = 0,001$).

Relative Fixationshäufigkeit AOI „Verkehr“: (Abbildung 5.16)

Für die relative Häufigkeit der Fixationen auf das AOI „Verkehr“ sehen die Unterschiede zwischen beiden Untersuchungsumgebungen in den Szenarien Autobahn und Stadt deutlich größer aus als für die Landstraße. Tabelle 5.13 enthält die wesentlichen deskriptiven Angaben.

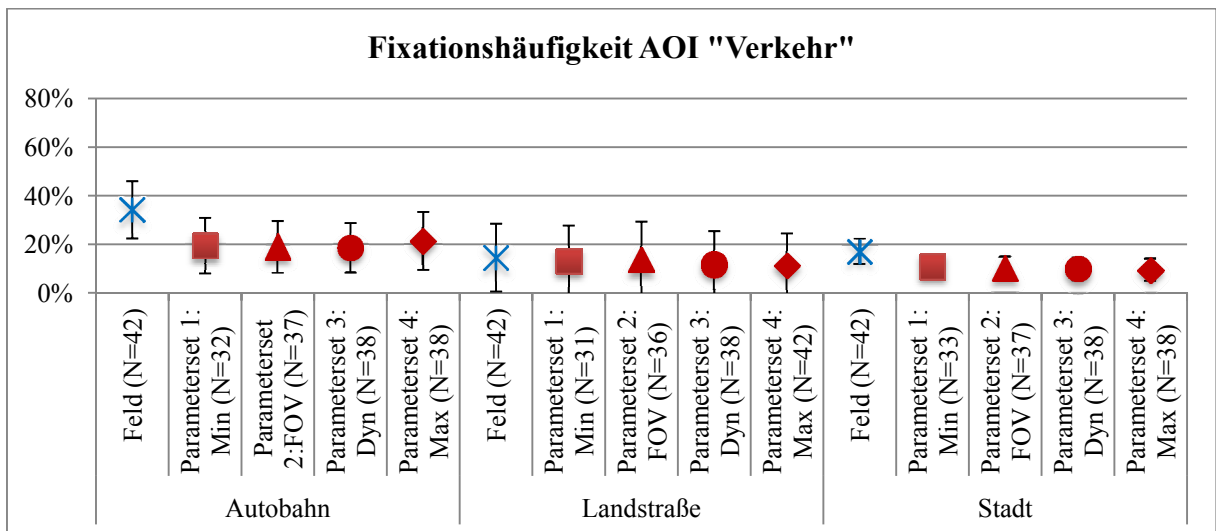


Abbildung 5.16: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Verkehr“.

Tabelle 5.13: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Verkehr“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 34,2$	$\sigma = 11,8$	$\bar{x} = 14,5$	$\sigma = 14,0$	$\bar{x} = 17,0$	$\sigma = 5,3$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 19,5$	$\sigma = 11,4$	$\bar{x} = 13,1$	$\sigma = 14,7$	$\bar{x} = 10,8$	$\sigma = 4,6$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 19,0$	$\sigma = 10,6$	$\bar{x} = 13,6$	$\sigma = 15,7$	$\bar{x} = 10,3$	$\sigma = 4,5$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 18,6$	$\sigma = 10,2$	$\bar{x} = 11,7$	$\sigma = 13,8$	$\bar{x} = 9,9$	$\sigma = 4,5$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 21,4$	$\sigma = 11,9$	$\bar{x} = 11,3$	$\sigma = 13,2$	$\bar{x} = 9,5$	$\sigma = 4,5$

Auf der *Autobahn* liegt der Kennwert im Feld signifikant über denen in allen vier Parametersets (LH_1 : $t(31) = 6,745$; $p = 0,000$; LH_2 : $t(36) = 5,855$; $p = 0,000$; LH_3 : $t(37) = 7,095$; $p = 0,000$; LH_4 : $t(37) = 5,321$; $p = 0,000$). In diesem Fall übt der Messwiederholungsfaktor keinen signifikanten Einfluss auf die Validitätsergebnisse aus, wie eine Varianzanalyse im zweiten Schritt zeigt (LH_5).

Auf der *Landstraße* hingegen fällt die relative Fixationshäufigkeit der Realfahrt nur geringfügig höher aus als in den vier Parametersets; es finden sich keine signifikanten Unterschiede.

Die Differenzen zwischen Feld und Fahrsimulator *Innerorts* fallen wieder durchweg signifikant aus (LH_1 : $t(32) = 4,934$; $p = 0,000$; LH_2 : $t(36) = 6,422$; $p = 0,000$; LH_3 : $t(37) = 6,882$; $p = 0,000$; LH_4 : $t(37) = 7,754$; $p = 0,000$). Analog zur Autobahn Betrachtung ergibt sich auch in diesem Falle kein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors auf die Ergebnisse (LH_5).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Verkehr auf der Autobahn und Innerorts im Feld signifikant häufiger betrachtet wird als im Fahrsimulator. Dies kann wiederum an der erhöhten Verkehrsdichte in realer Untersuchungsumgebung liegen. Naheliegender ist jedoch das bereits angesprochene erhöhte Gefährdungspotential, welches von realen Verkehrsteilnehmern ausgeht und im Fahrsimulator nicht gegeben ist. Auf der Landstraße hingegen unterscheiden sich die Verkehrsdichten nicht gravierend, sodass ein Indiz für absolute Validität gegeben ist. Insgesamt zeigt sich demnach ein Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Validitätsergebnisse (LH_5), während kein Unterschied zwischen einzelnen Parametersets festzustellen ist.

Analog zur relativen Fixationsdauer wird auch für die Fixationshäufigkeit noch einmal eine getrennte Betrachtung der Szenarien Freie Fahrt und Folgefahrt durchgeführt (Abbildung 5.17), um den Einfluss der unterschiedlichen Verkehrsdichte auf der Autobahn zwischen beiden Untersuchungsumgebungen bemessen zu können.

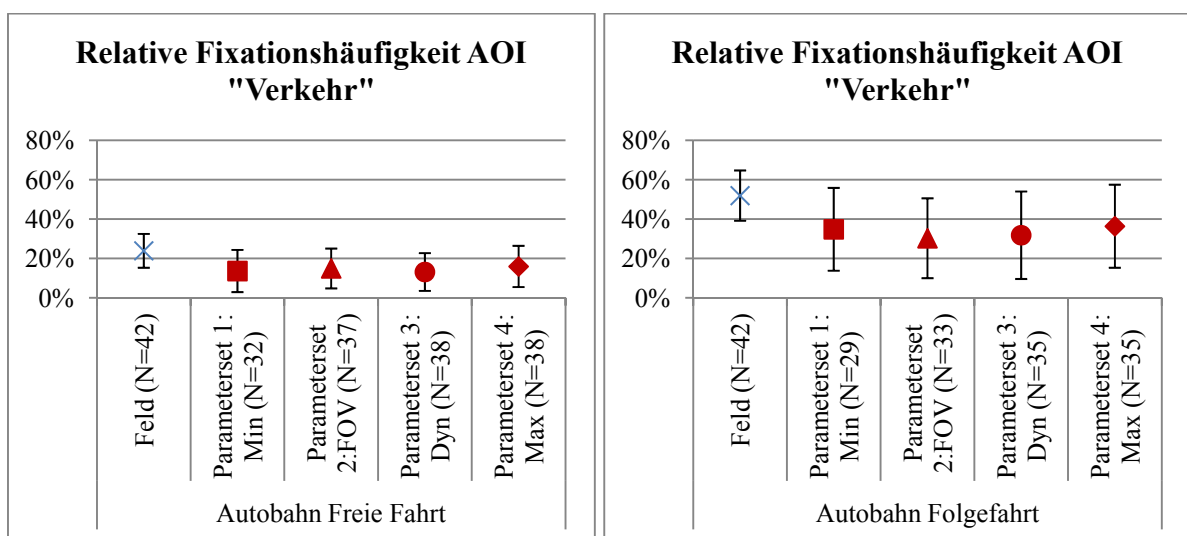


Abbildung 5.17: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Verkehr“, getrennt nach Freier Fahrt (links) und Folgefahrt (rechts) auf der Autobahn.

Die Ergebnisse unterscheiden sich bei Freier Fahrt auf der Autobahn zwischen beiden Untersuchungsumgebungen signifikant (LH₁: t(31) = 4,386; LH₂: z = -3,387; p = 0,001; LH₃: t(37) = 5,172; p = 0,000; LH₄: t(37) = 3,563; p = 0,001). Ebenfalls signifikant fallen auch die Differenzen zwischen Feld und Simulator für die Folgefahrt aus (LH₁: t(28) = 4,269; p = 0,000; LH₂: t(32) = 5,346; p = 0,000; LH₃: t(34) = 5,877; p = 0,000; LH₄: t(34) = 4,736; p = 0,000). Da beide Szenarien ähnliche Validitätsergebnisse zeigen und sich die Verkehrsdichte primär auf eine Folgefahrt auswirkt, scheint es keinen störenden Einfluss unterschiedlicher Verkehrsteilnehmerzahlen auf die fahrerverhaltensbezogenen Validitätskennwerte zu geben. Die Fahrdynamikkennwerte hingegen werden teilweise beeinträchtigt, wie bereits gezeigt wurde.

Relative Fixationsdauer AOI „Gegenverkehr“: (Abbildung 5.18)

Die relative Fixationsdauer auf das AOI „Gegenverkehr“ fällt auf der Autobahn, unabhängig von der Untersuchungsumgebung, deutlich geringer aus als auf Landstraße oder innerhalb der Stadt. Eine Zusammenfassung der deskriptiven Werte findet sich in Tabelle 5.14.

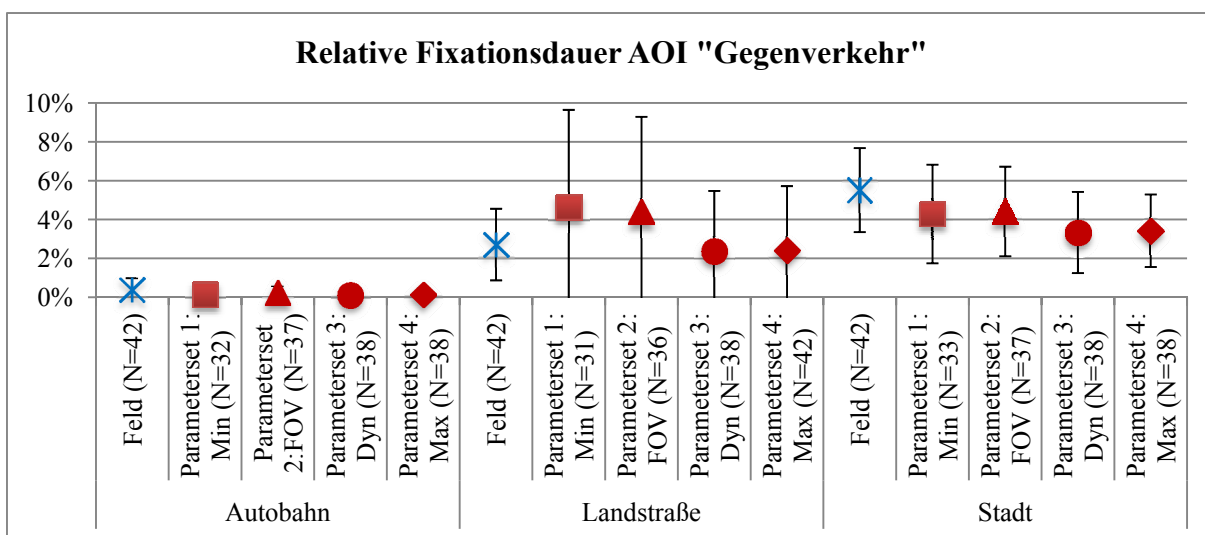


Abbildung 5.18: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Gegenverkehr“.

Tabelle 5.14: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Gegenverkehr“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 0,4$	$\sigma = 0,6$	$\bar{x} = 2,7$	$\sigma = 1,8$	$\bar{x} = 5,5$	$\sigma = 2,2$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 0,2$	$\sigma = 0,3$	$\bar{x} = 4,6$	$\sigma = 5,0$	$\bar{x} = 4,3$	$\sigma = 2,5$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 0,2$	$\sigma = 0,3$	$\bar{x} = 4,4$	$\sigma = 4,9$	$\bar{x} = 4,4$	$\sigma = 2,3$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 0,1$	$\sigma = 0,2$	$\bar{x} = 2,4$	$\sigma = 3,1$	$\bar{x} = 3,3$	$\sigma = 2,1$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 0,1$	$\sigma = 0,3$	$\bar{x} = 2,4$	$\sigma = 3,3$	$\bar{x} = 3,4$	$\sigma = 1,9$

Auf der *Autobahn* erweist sich der Unterschied zwischen den Ergebnissen aus Feld und drei der vier Parametersets als signifikant (LH₁: z = -3,018; p = 0,003; LH₃: z = -3,411; p = 0,001;

LH₄: $z = -3,206$; $p = 0,001$). Einzig die relative Fixationsdauer zwischen der Realfahrt und Parameterset 2 zeigt nur geringe Unterschiede auf.

Bei einer Betrachtung der *Landstraße* fallen die besonders großen Standardabweichungen bei Parameterset 1 und Parameterset 2 auf. Die dazugehörigen Mittelwerte weisen dabei jedoch ebenso wenig einen signifikanten Unterschied zum Feld auf wie Parameterset 3 und Parameterset 4.

In der *Stadt* hingegen liegt die relative Fixationsdauer auf den Gegenverkehr im Feld signifikant über den Ergebnissen in drei der vier Parametersets (LH₂: $t(36) = 2,055$; $p = 0,047$; LH₃: $t(37) = 4,781$; $p = 0,000$; LH₄: $t(37) = 0,681$; $p = 0,000$). Lediglich Parameterset 1 weicht nicht signifikant vom Feld ab.

Für die relative Fixationsdauer auf den Gegenverkehr zeigt die Betrachtung der Landstraße ein Indiz für absolute Validität, unabhängig vom Parameterset. Für die Autobahn und Stadt hingegen ergeben sich größtenteils signifikante Unterschiede zwischen beiden Untersuchungsumgebungen. Es zeigt sich demnach sowohl ein Einfluss des Untersuchungsszenarios (LH₅) als auch des Parametersets auf die Validitätsergebnisse. Dabei wird der Gegenverkehr im Feld im Falle eines signifikanten Ergebnisses länger betrachtet als im Fahrsimulator. Dies ist insbesondere mit dem in der realen Umgebung herrschenden höheren Gefährdungspotential, das von anderen Verkehrsteilnehmern ausgeht, zu begründen.

Relative Fixationshäufigkeit AOI „Gegenverkehr“: (Abbildung 5.19)

Für die relative Fixationshäufigkeit auf das AOI „Gegenverkehr“ ergeben sich insbesondere für die Landstraße im Fahrsimulator hohe Standardabweichungen. Einen Überblick über die einzelnen Mittelwerte und Standardabweichungen der drei Szenerien liefert Tabelle 5.15.

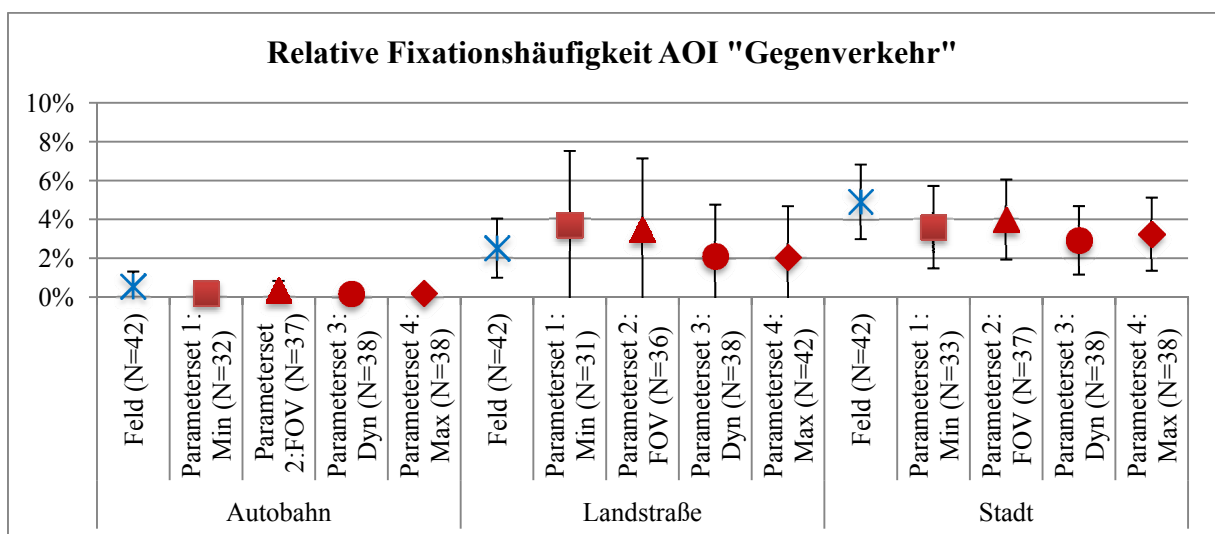


Abbildung 5.19: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Gegenverkehr“.

Tabelle 5.15: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Gegenverkehr“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 0,6$	$\sigma = 0,8$	$\bar{x} = 2,5$	$\sigma = 1,5$	$\bar{x} = 4,9$	$\sigma = 1,9$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 0,2$	$\sigma = 0,3$	$\bar{x} = 3,7$	$\sigma = 3,8$	$\bar{x} = 3,6$	$\sigma = 2,1$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 0,4$	$\sigma = 0,4$	$\bar{x} = 3,5$	$\sigma = 3,7$	$\bar{x} = 4,0$	$\sigma = 2,1$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 0,2$	$\sigma = 0,3$	$\bar{x} = 2,1$	$\sigma = 2,7$	$\bar{x} = 2,9$	$\sigma = 1,8$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 0,2$	$\sigma = 0,3$	$\bar{x} = 2,1$	$\sigma = 2,6$	$\bar{x} = 3,2$	$\sigma = 1,9$

Die relative Betrachtungshäufigkeit des Gegenverkehrs unterscheidet sich auf der *Autobahn* nur zwischen Feld und Parameterset 2 nicht signifikant. Bei allen anderen Fahr Simulatorfahrten fällt der Kennwert signifikant geringer aus als im Realfahrzeug (LH₁: $z = -2,724$; $p = 0,006$; LH₃: $z = -3,325$; $p = 0,001$; LH₄: $z = -3,086$; $p = 0,002$).

Bei der Szenerie *Landstraße* zeigen sich keine großen Abweichungen zwischen Feld und Parameterset 1 bis 3. Lediglich Parameterset 4 weist eine signifikant geringere relative Fixationshäufigkeit auf das AOI „Gegenverkehr“ auf verglichen mit der Realfahrt (LH₄: $z = -2,094$; $p = 0,036$).

In der *Stadt* fällt der Kennwert im Feld signifikant höher aus als für drei der vier Fahrten in simulierter Umgebung (LH₁: $z = -2,510$; $p = 0,012$; LH₃: $z = -4,010$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -3,372$; $p = 0,001$). Parameterset 2 hingegen weicht nicht signifikant vom Feld ab.

Die relative Fixationshäufigkeit auf den Gegenverkehr zeigt je Szenerie in mindestens einem Parameterset einen signifikanten Unterschied zum Feld. Dies impliziert sowohl einen Einfluss des Parametersets als auch des Untersuchungsszenarios (LH₅) auf die Validitätsergebnisse. Dabei verhalten sich alle als signifikant identifizierten Ergebnisse insoweit identisch, als dass im Feld häufiger auf den Gegenverkehr geschaut wird. Dies kann mit der bereits mehrfach angesprochenen realen Gefahrenquelle erklärt werden, die im Feld von anderen Verkehrsteilnehmern ausgeht.

Relative Fixationsdauer AOI „Tacho“: (Abbildung 5.20)

Auch die relative Fixationsdauer auf das AOI „Tacho“ weist enorme Standardabweichungen, vor allem in simulierter Untersuchungsumgebung, auf. Die entsprechenden deskriptiven Werte finden sich in Tabelle 5.16.

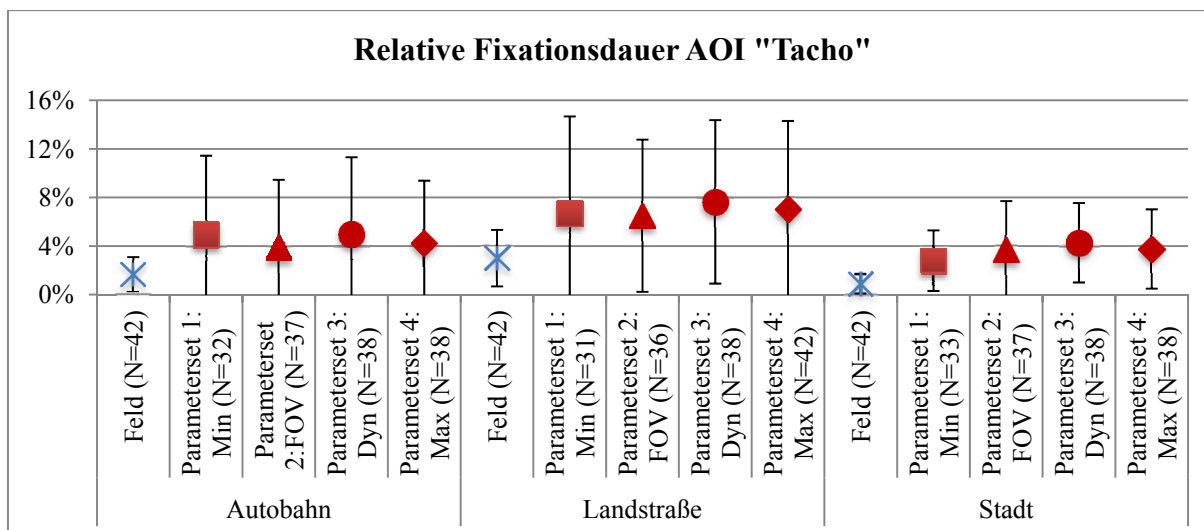


Abbildung 5.20: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Tacho“.

Tabelle 5.16: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Tacho“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 1,7$	$\sigma = 1,4$	$\bar{x} = 3,0$	$\sigma = 2,3$	$\bar{x} = 0,9$	$\sigma = 0,8$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 4,9$	$\sigma = 6,5$	$\bar{x} = 6,7$	$\sigma = 8,0$	$\bar{x} = 2,8$	$\sigma = 2,5$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 3,9$	$\sigma = 5,5$	$\bar{x} = 6,5$	$\sigma = 6,3$	$\bar{x} = 3,7$	$\sigma = 4,0$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 5,0$	$\sigma = 6,3$	$\bar{x} = 7,6$	$\sigma = 6,7$	$\bar{x} = 4,3$	$\sigma = 3,3$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 4,2$	$\sigma = 5,1$	$\bar{x} = 7,0$	$\sigma = 7,3$	$\bar{x} = 3,8$	$\sigma = 3,3$

Auf der *Autobahn* liegen die Ergebnisse der Feldfahrt signifikant unter denen aus Parameterset 3 (LH₃: $z = -2,110$; $p = 0,035$), während Parameterset 1, Parameterset 2 und Parameterset 4 zwar Abweichungen zeigen, diese jedoch nicht signifikant sind.

Bei der *Landstraße* liegt die relative Fixationsdauer auf den Tacho im Feld signifikant unter der in allen Fahr simulatorfahrten (LH₁: $z = -2,93$; $p = 0,022$; LH₂: $z = -2,309$; $p = 0,021$; LH₃: $t(37) = -3,945$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -2,896$; $p = 0,004$). Die Betrachtung von Leithypothese LH₅ zeigt keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors und somit des Parametersets.

Die Standardabweichungen fallen in der Szenerie *Stadt* zwar nicht so groß aus für den Fahr simulator, dennoch ergeben sich auch hier für alle vier Simulatorendaten signifikante Unterschiede zu den Felddaten (LH₁: $z = -2,743$; $p = 0,006$; LH₂: $z = -3,628$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -4,270$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -4,126$; $p = 0,000$). Im zweiten Analyseschritt ergibt die Varianzanalyse mit Messwiederholung einen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors auf die Ergebnisse (LH₅: $F(2,230) = 3,202$; $p = 0,042$). Ein anschließender paarweiser T-Test deckt einen signifikanten Unterschied zwischen Parameterset 1 und 3 auf ($p = 0,037$).

Zusammenfassend lässt sich hinsichtlich des Kennwerts der relativen Fixationsdauer auf den Tacho sagen, dass sich sowohl für Landstraße als auch Stadt über alle Parametersets hinweg signifikante Unterschiede zum Feld ergeben, wobei der Tacho in simulierter Untersuchungs-

umgebung länger betrachtet wird. Dies kann durch die schwierigere Geschwindigkeitseinschätzung im Fahrsimulator erklärt werden. Dennoch zeigt sich hier nicht die erwartete Wahrnehmungsverbesserung bei aktivierter Bewegungsplattform und somit kein Parameterinfluss für die beiden Szenarien. Bei der Autobahn hingegen liefert eine Betrachtung zwischen Realfahrt und Parameterset 1, 2 sowie 4 ein Indiz für absolute Validität, während in Parameterset 3 wiederum signifikant länger auf den Tacho geschaut wird als im Feld. Es ist ein Einfluss des Untersuchungsszenarios (LH_s) ebenso zu verzeichnen wie ein Einfluss des Parametersets.

Relative Fixationshäufigkeit AOI „Tacho“: (Abbildung 5.21)

Auch bei der relativen Fixationshäufigkeit auf das AOI „Tacho“ fallen enorme Standardabweichungen vor allem für die simulierte Untersuchungsumgebung auf. Tabelle 5.17 gibt einen Überblick über die entsprechenden deskriptiven Daten.

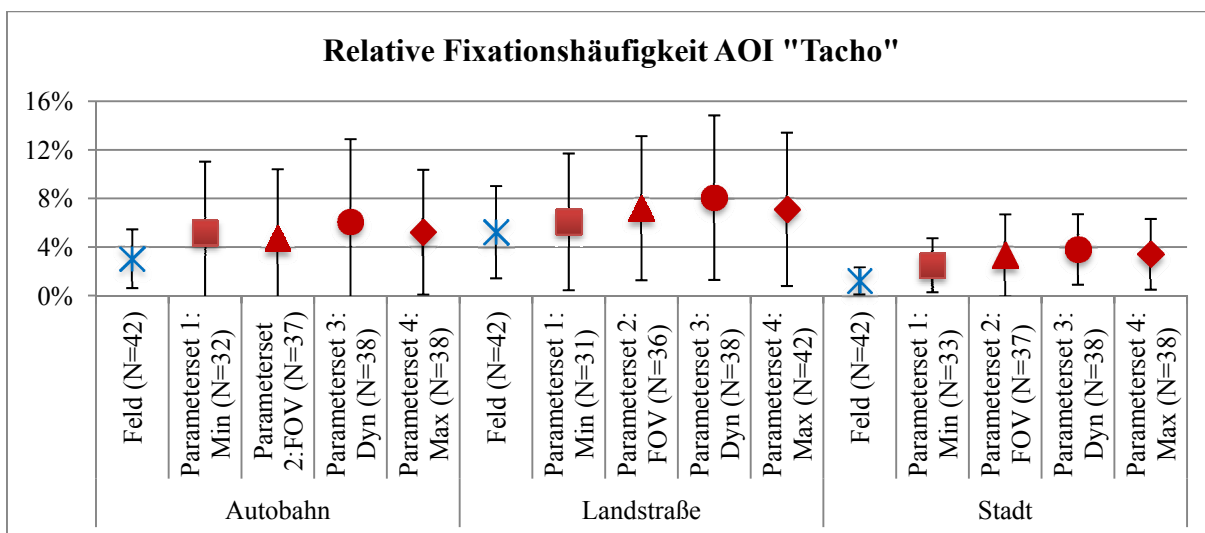


Abbildung 5.21: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Tacho“.

Tabelle 5.17: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Tacho“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 3,0$	$\sigma = 2,4$	$\bar{x} = 5,2$	$\sigma = 3,8$	$\bar{x} = 1,2$	$\sigma = 1,1$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 5,2$	$\sigma = 5,8$	$\bar{x} = 6,1$	$\sigma = 5,6$	$\bar{x} = 2,5$	$\sigma = 2,2$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 4,7$	$\sigma = 5,7$	$\bar{x} = 7,2$	$\sigma = 5,9$	$\bar{x} = 3,3$	$\sigma = 3,4$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 6,1$	$\sigma = 6,8$	$\bar{x} = 8,1$	$\sigma = 6,8$	$\bar{x} = 3,8$	$\sigma = 2,9$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 5,2$	$\sigma = 5,1$	$\bar{x} = 7,1$	$\sigma = 6,3$	$\bar{x} = 3,4$	$\sigma = 2,9$

Für die *Autobahn* liegen die Werte im Feld zwar unter denen im Fahrsimulator, diese Differenz erweist sich jedoch nicht als signifikant.

Für die *Landstraße* zeigen sich zumindest für den Vergleich zwischen der Realfahrt und Parameterset 1, 2 und 4 ähnliche, nicht signifikante Unterschiede. In Parameterset 3 hingegen

fällt die relative Fixationshäufigkeit signifikant höher aus als im Feld ($LH_3: t(37) = -2,220; p = 0,033$).

In der Szenerie *Stadt* ergeben sich zwischen der Feldfahrt und allen vier Fahrsimulatorfahrten signifikante Unterschiede ($LH_1: z = -2,189; p = 0,029; LH_2: z = -2,914; p = 0,005; LH_3: z = -4,256; p = 0,000; LH_4: z = -3,719; p = 0,000$), wobei die relative Fixationshäufigkeit im Feld niedriger ausfällt. Eine Varianzanalyse zur Überprüfung von LH_5 identifiziert in diesem Fall einen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors ($F(2,275) = 3,288; p = 0,037$). Eine anschließende paarweise Betrachtung mittels T-Test zeigt, dass sich Parameterset 1 und 3 signifikant voneinander unterscheiden ($p = 0,022$).

Der Tacho wird Innerorts im Fahrsimulator, ungeachtet des Parametersets, signifikant häufiger betrachtet als im Feld. Eine mögliche Erklärung kann erneut die erschwerte Geschwindigkeitswahrnehmung in simulierter Umgebung sein. Zudem wird die Geschwindigkeit im Fahrsimulator als Head-up-Information eingeblendet, sodass die Probanden eher dazu verleitet werden, öfter kurz auf die Anzeige zu schauen. Auf der Autobahn kann jedoch für alle Parametersets ein Indiz für absolute Validität erzielt werden. Es zeigt sich hier demnach wiederum ein Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Validitätskennwerte (LH_5). Auf der Landstraße ergibt sich zudem ein Unterschied zwischen den Parametersets, da hier Parameterset 4 einen signifikanten Unterschied zum Feld aufweist, während die anderen Fahrsimulatorfahrten nicht signifikant unterschiedlich ausfallen.

Relative Fixationsdauer AOI „Ampel/Schild“: (Abbildung 5.22)

Die relative Fixationsdauer auf das AOI „Ampel/Schild“ liegt auf Autobahn und Landstraße erwartungsgemäß unter den Werten in der Stadt. Tabelle 5.18 gibt einen Überblick über die jeweiligen Mittelwerte und Standardabweichungen.

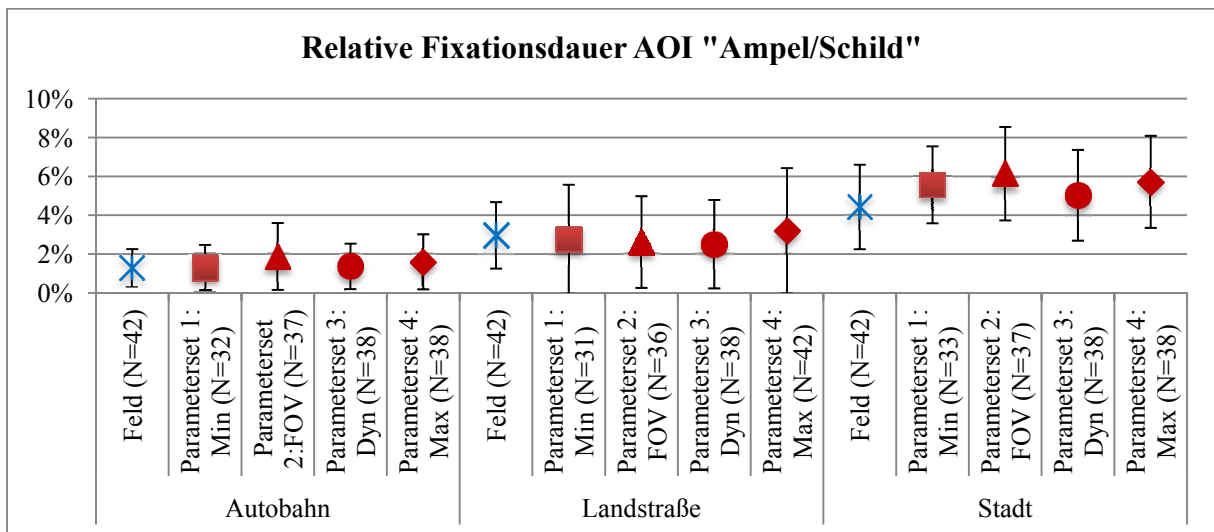


Abbildung 5.22: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Ampel/Schild“.

Tabelle 5.18: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationsdauer AOI Ampel/Schild“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 1,3$	$\sigma = 1,0$	$\bar{x} = 3,0$	$\sigma = 1,7$	$\bar{x} = 4,4$	$\sigma = 2,2$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 1,3$	$\sigma = 1,2$	$\bar{x} = 2,8$	$\sigma = 2,8$	$\bar{x} = 5,6$	$\sigma = 2,0$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 1,9$	$\sigma = 1,7$	$\bar{x} = 2,6$	$\sigma = 2,4$	$\bar{x} = 6,1$	$\sigma = 2,4$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 1,4$	$\sigma = 1,2$	$\bar{x} = 2,5$	$\sigma = 2,3$	$\bar{x} = 5,0$	$\sigma = 2,3$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 1,6$	$\sigma = 1,4$	$\bar{x} = 3,2$	$\sigma = 3,2$	$\bar{x} = 5,7$	$\sigma = 2,4$

Die relative Fixationsdauer auf das AOI „Ampel/Schild“ fällt für die Szenerie *Autobahn* zwischen realer und simulierter Umgebung ähnlich aus. Es erweist sich keiner der Vergleiche als signifikant, sodass absolute Validität angenommen werden kann.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich auf der *Landstraße*, bei der sich die Blickbewegungsdaten zwischen Feld und Fahrsimulator allesamt nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Ein anderes Bild ergibt sich jedoch für die Szenerie *Stadt*, bei der die relative Fixationshäufigkeit im Feld signifikant geringer ausfällt als in Parameterset 2 (LH₂: $z = -2,949$; $p = 0,003$) und Parameterset 4 (LH₄: $z = -2,821$; $p = 0,005$). Parameterset 1 und Parameterset 3 hingegen weisen keine derart großen Abweichungen von der Realfahrt auf.

Zusammenfassend lässt sich für die relative Fixationsdauer auf das AOI „Ampel/Schild“ festhalten, dass sich ein Einfluss des Parametersets auf die Validitätsergebnisse bestimmen lässt. So fällt die relative Fixationsdauer Innerorts für die Realfahrt jeweils kleiner aus als für Parameterset 1 und 3; dieser Unterschied hat jedoch keine signifikante Größe. Im Gegensatz dazu erweist sich ein Vergleich zwischen Feld und den anderen beiden Parametersets durchaus als signifikant. Bei Autobahn und Landstraße liefern hingegen alle Parametersets ein Indiz für absolute Validität. Demnach ergibt sich ein Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Validitätsergebnisse (LH₅). Die Fixationsdauer auf Ampel und Schild liegt im Feld nahezu ausnahmslos unter der im Fahrsimulator, was zum einen auf eine möglicherweise länger andauernde Rotphase im Realen zurückgeführt werden kann. Zudem ist die Erkennung von Schildern in simulierter Umgebung aufgrund einer begrenzten Auflösung der bildgebenden Medien erschwert, sodass die Probanden länger benötigen, um die Intention des Verkehrszeichens zu erfassen.

Relative Fixationshäufigkeit AOI „Schild/Ampel“: (Abbildung 5.23)

Die relative Fixationshäufigkeit auf das AOI „Schild/Ampel“ unterscheidet sich zwischen beiden Untersuchungsumgebungen für die Szenerie *Autobahn* nur gering, während sich für *Landstraße* und *Stadt* auf den ersten Blick größere Abweichungen zeigen. Tabelle 5.19 enthält die jeweiligen Mittelwerte und Standardabweichungen.

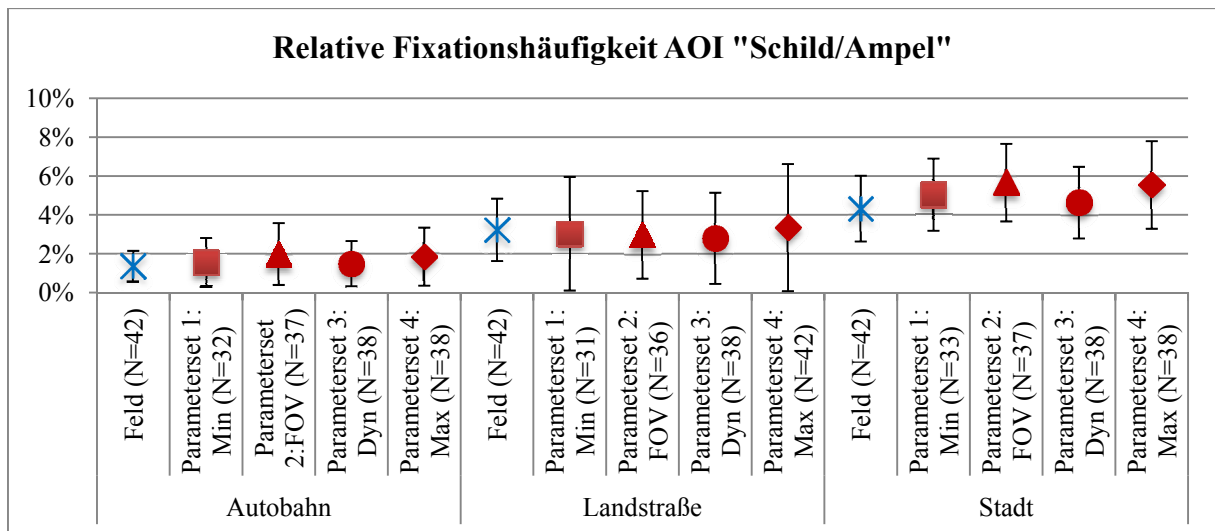


Abbildung 5.23: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Ampel/Schild“.

Tabelle 5.19: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „Relative Fixationshäufigkeit AOI Ampel/Schild“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 1,4$	$\sigma = 0,8$	$\bar{x} = 3,2$	$\sigma = 1,6$	$\bar{x} = 4,3$	$\sigma = 1,7$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 1,6$	$\sigma = 1,3$	$\bar{x} = 3,0$	$\sigma = 2,9$	$\bar{x} = 5,0$	$\sigma = 1,9$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 2,0$	$\sigma = 1,6$	$\bar{x} = 3,0$	$\sigma = 2,3$	$\bar{x} = 5,7$	$\sigma = 2,0$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 1,5$	$\sigma = 1,2$	$\bar{x} = 2,8$	$\sigma = 2,3$	$\bar{x} = 4,6$	$\sigma = 1,8$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 1,8$	$\sigma = 1,5$	$\bar{x} = 3,3$	$\sigma = 3,3$	$\bar{x} = 5,5$	$\sigma = 2,3$

Für die *Autobahn* liegt der Mittelwert der Realfahrt nur gering unter den Werten der vier Parametersets; es ergeben sich keine signifikanten Unterschiede.

Auch die Unterschiede zwischen realer und simulierter Umgebung für die *Landstraße* fallen nicht signifikant aus.

Innerorts ergeben sich zumindest zwischen Feld und Parameterset 2 ($LH_2: t(36) = -3,040; p = 0,004$) sowie Parameterset 4 ($LH_4: t(37) = -2,692; p = 0,011$) signifikante Unterschiede mit geringerer relativer Fixationshäufigkeit in realer Umgebung. Die anderen beiden Parametersets unterscheiden sich hingegen nicht signifikant vom Feld.

Die relative Fixationshäufigkeit auf das AOI „Ampel/Schild“ liefert sowohl für die Autobahn als auch für die Landstraße ein Indiz für absolute Validität aller Parametersets. Einzig in der Stadt ergibt sich eine signifikant geringere Fixationshäufigkeit in realer Umgebung als in Parameterset 2 und 4. Auch für die beiden anderen Parametersets fällt die Fixationshäufigkeit im Simulator länger aus als im Feld. Grundsätzlich betrachten die Probanden demnach Ampeln und Schilder im Fahrsimulator häufiger, da sie diese vermutlich bereits früh entdecken, aber aufgrund der begrenzten Auflösung und Kontrastschärfe des bildgebenden Mediums erst später erkennen können. Unabhängig davon unterscheiden sich die beiden Parametersets mit erweiterter Sicht (Parameterset 2 und 4) von denen mit eingeschränkter Sichtsimitation (Parameterset 1 und 3), wobei die Probanden bei beschränkter Sicht weniger häufig auf das AOI

„Ampel/Schild“ schauen. Dies liegt an der Problematik, dass bei eingeschränkter Sicht die Ampel an vielen Stellen nicht gesehen werden kann, da sie sich in einem der äußeren Monitore befinden würde. Dies erklärt den Unterschied zwischen den Parametersets. Ebenso zeigt sich ein Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Validitätsergebnisse (LH₅).

Zusammenfassung:

Auch für die Blickbewegungskennwerte finden sich die Ergebnisse übersichtlich und mit direktem Bezug zur jeweiligen Untersuchungshypothese in Tabelle 5.20 zusammengefasst.

Im Unterschied zu den schon vorgestellten Fahrdynamikkennwerten findet sich im Bereich der Blickbewegung der Probanden kein Kennwert, der im beschriebenen Versuch niemals valide wird. Es lässt sich jeweils mindestens eine Kombination aus Parameterset und Szenario benennen, welche zu vergleichbaren bzw. nicht signifikant unterschiedlichen Ergebnissen zwischen realer und simulierter Untersuchungsumgebung führt.

Dennoch lassen sich auch hier Einflüsse der Gestaltungsparameter auf die Validität identifizieren. So erweist sich die Fixationsdauer auf das AOI „Ampel/Schild“ in der Stadt nur für bestimmte Parametersets als valide, während bei anderen Fahrsimulorkonfigurationen signifikante Unterschiede zum Feld zu verzeichnen sind. Auch hier zeigt sich, in Analogie zu den Fahrdynamikkennwerten, dass eine Gestaltungsparametererweiterung dabei nicht zwangsläufig positive Auswirkungen auf die Validität hat.

Neben den Gestaltungsparametern zeigt sich ebenfalls der Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Validitätsergebnisse. Während die Fixationsdauer auf das AOI „Gegenverkehr“ auf der Landstraße über alle Parametersets valide ausfällt, zeigt sich für die Autobahn und die Stadt kein so stimmiges Ergebnis.

Tabelle 5.20: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesen und statistischen Ergebnisse für die Fahrerverhaltenskennwerte (die mit Sternchen*) markierten und grün hinterlegten Kästchen zeigen einen auf einem 5%-Niveau signifikanten Unterschied zwischen Feld und Fahrsimulator und somit kein Indiz für absolute Validität; das Verhältnis der Ergebnisse aus Feld und Fahrsimulator zueinander wird in Klammern angegeben (<, =, >), A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, G = Gesamtszenarie).

Kennwerte	Szenario/ Szenerie	LH ₁		LH ₂		LH ₃		LH ₄	
		Feld - Set 1	Feld - Set 2	Feld - Set 2	Feld - Set 3	Feld - Set 3	Feld - Set 4	Feld - Set 4	
Fixationsdauer Straße	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(>)
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(>)
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (<)
Fixationshäufigkeit Straße	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(>)
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)

Kennwerte	Szenario/ Szenerie	LH ₁		LH ₂		LH ₃		LH ₄	
		Feld - Set 1	Feld - Set 2	Feld - Set 2	Feld - Set 2	Feld - Set 3	Feld - Set 3	Feld - Set 4	Feld - Set 4
Fixationshäufigkeit Ampel/Schild	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	<*)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	<*)

5.4 Physiologische Kennwerte

Die im Folgenden mit ihren Ergebnissen dargestellten physiologischen Kennwerte liefern einen Hinweis auf die Beanspruchung der Probanden während der Versuchsfahrten. Ähnlich wie bei den Blickbewegungsdaten werden auch diese Kennwerte jeweils für eine komplette Szenerie betrachtet. Dabei ergibt sich beim Hautleitwert die Besonderheit einer unterschiedlichen Kennwertbetrachtung für die Szenerien Autobahn bzw. Landstraße und Stadt.

Arbeitsherzschlagfrequenz (ARHR): (Abbildung 5.24)

Eine Betrachtung der Arbeitsherzschlagfrequenz zeigt auf den ersten Blick eine deutlich erhöhte Beanspruchung in realer gegenüber simulierter Untersuchungsumgebung. Tabelle 5.21 fasst die Mittelwerte und Standardabweichungen für die einzelnen Szenerien zusammen.

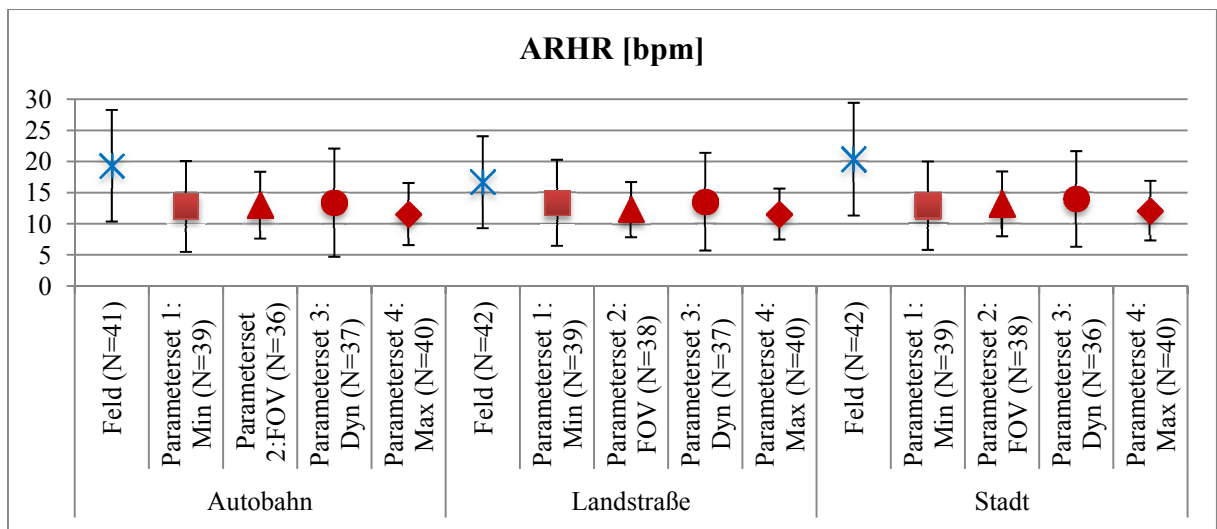


Abbildung 5.24: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „ARHR“.

Tabelle 5.21: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „ARHR“ in [bpm].

	Autobahn	Landstraße	Stadt
Feld	$\bar{x} = 19,3 \quad \sigma = 9,0$	$\bar{x} = 16,7 \quad \sigma = 7,4$	$\bar{x} = 20,4 \quad \sigma = 9,1$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 12,8 \quad \sigma = 7,3$	$\bar{x} = 13,4 \quad \sigma = 6,9$	$\bar{x} = 12,9 \quad \sigma = 7,1$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 13,0 \quad \sigma = 5,4$	$\bar{x} = 12,3 \quad \sigma = 4,4$	$\bar{x} = 13,2 \quad \sigma = 5,2$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 13,4 \quad \sigma = 8,7$	$\bar{x} = 13,5 \quad \sigma = 7,9$	$\bar{x} = 14,0 \quad \sigma = 7,7$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 11,6 \quad \sigma = 5,0$	$\bar{x} = 11,6 \quad \sigma = 4,1$	$\bar{x} = 12,1 \quad \sigma = 4,8$

Auf der *Autobahn* liegt der ARHR-Wert im Feld über den Werten im Fahrsimulator. Diese Unterschiede erweisen sich im Rahmen einer paarweisen statistischen Vergleichsbetrachtung durchweg als signifikant (LH₁: $z = -3,433$, $p = 0,001$; LH₂: $z = -4,197$, $p = 0,000$; LH₃: $z = -3,248$, $p = 0,001$; LH₄: $t(38) = 5,765$, $p = 0,000$). Der Friedman-Test zur Überprüfung des Einflusses des Messwiederholungsfaktors zeigt hingegen keine Signifikanz.

Auch auf der *Landstraße* zeichnet sich eine Abweichung zwischen der Arbeitsherzschlagfrequenz im Feld und in den vier Parametersets ab. Analog zur Autobahnfahrt fällt auch diese Differenz zwischen den Untersuchungsumgebungen signifikant aus (LH₁: $t = -2,717$; $p = 0,007$; LH₂: $z = -4,100$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -2,093$; $p = 0,036$; LH₄: $z = -4,314$; $p = 0,000$). Im Gegensatz zur obigen Szeneriebetrachtung kann hier jedoch ein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors festgestellt werden ($F(4) = 14,065$; $p = 0,007$). Eine Post-hoc-Analyse zwischen den Parametersets im Fahrsimulator zeigt jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen einzelnen Fahrsimulatorfahrten.

Innerorts liegt die Arbeitsherzschlagfrequenz im Feld ebenfalls signifikant über den Werten im Fahrsimulator (LH₁: $t(38) = 4,601$; $p = 0,000$; LH₂: $t(37) = 5,786$; $p = 0,000$; LH₃: $t(35) = 3,056$; $p = 0,004$; LH₄: $t(39) = 5,815$; $p = 0,000$). Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung im Zuge der Überprüfung von Leithypothese LH₅ zeigt jedoch keine Signifikanz.

Zusammenfassend lässt sich für den Kennwert ARHR festhalten, dass sich weder ein Einfluss des Parametersets noch der Szenerie auf die Validitätsergebnisse bestimmen lässt. Für alle drei Szenerien und alle Fahrsimulatorfahrten ergibt sich ein signifikanter Unterschied zu den Feldergebnissen. Dabei liegt die Arbeitsherzschlagfrequenz in realer Umgebung jeweils deutlich über der in simulierter Versuchsumgebung. Diese Grundrichtung lässt sich anhand weiterer Studien wie Engström et al. (2005) und Johnson et al. (2011) bestätigen. Im realen Umfeld herrscht ein deutlich höheres Gefährdungsrisiko der Probanden, da Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern sowie weitere Unfallgefahren drohen. Dies ist im Fahrsimulator nicht der Fall, was den Probanden durchaus bewusst ist. Entsprechend kann absolute Validität für den Kennwert Arbeitsherzschlagfrequenz ausgeschlossen werden.

Hautleitwert (ARSCL und SCR-Amplitude): (Abbildung 5.25 und Abbildung 5.26)

Für die Szenerien geringer Komplexität, Autobahn und Landstraße, findet als zweiter Beanspruchungskennwert das tonische Hautleitwertniveau (ARSCL) Beachtung. Auf den ersten Blick lassen sich keine großen Abweichungen zwischen beiden Untersuchungsumgebungen feststellen; Tabelle 5.22 enthält die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen.

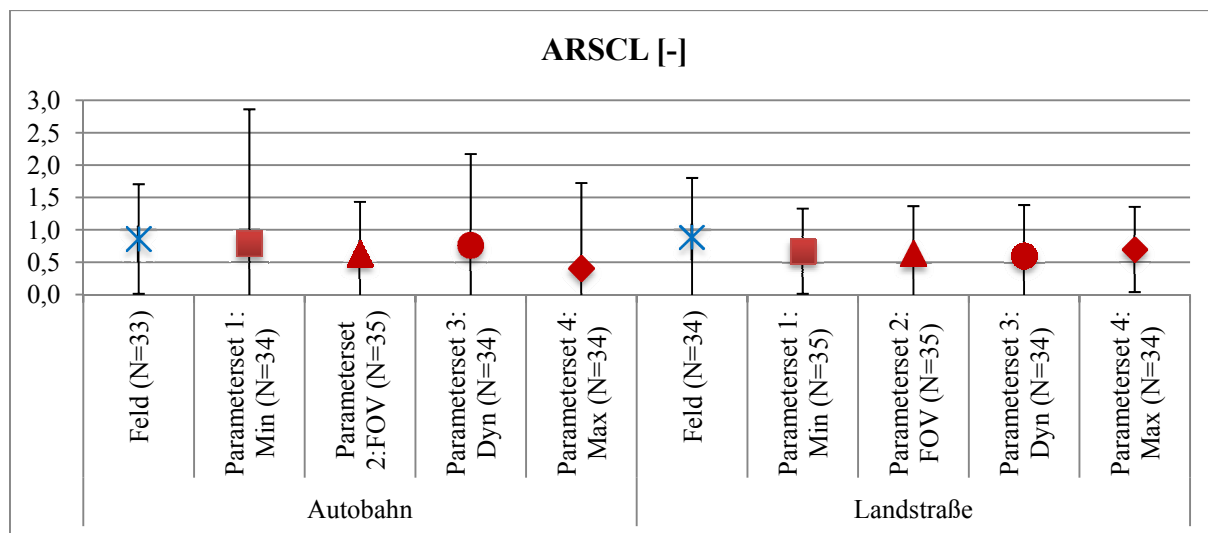


Abbildung 5.25: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „ARSCL“.

Tabelle 5.22: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „ARSCL“.

	Autobahn		Landstraße	
Feld	$\bar{x} = 0,86$	$\sigma = 0,85$	$\bar{x} = 0,89$	$\sigma = 0,91$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 0,79$	$\sigma = 2,07$	$\bar{x} = 0,67$	$\sigma = 0,66$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 0,63$	$\sigma = 0,80$	$\bar{x} = 0,64$	$\sigma = 0,73$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 0,76$	$\sigma = 1,41$	$\bar{x} = 0,60$	$\sigma = 0,78$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 0,41$	$\sigma = 1,32$	$\bar{x} = 0,70$	$\sigma = 0,66$

Auf der *Autobahn* liegt das tonische Hautleitwertniveau in realer Umgebung lediglich etwas höher als im Fahrsimulator. Eine statistische Analyse der einzelnen Datenpaare bestätigt den ersten Eindruck; keiner der Vergleiche zwischen Feld und Fahrsimulator gestaltet sich als signifikant unterschiedlich. Ein Indiz für absolute Validität gilt somit als gegeben.

Die Abweichungen zwischen Feld und Fahrsimulator auf der *Landstraße* fallen zwar etwas größer, jedoch ebenfalls nicht stark unterschiedlich bzw. signifikant aus. Auch für die Landstraße kann somit ein Indiz für absolute Validität bestätigt werden.

Für die deutlich komplexere Szenerie der *Stadtfahrt* wird nicht auf einen tonischen, sondern auf einen phasischen Hautleitwertsanteil, die SCR-Amplitude, zurückgegriffen (Abbildung 5.26). Tabelle 5.23 enthält die entsprechenden deskriptiven Daten.

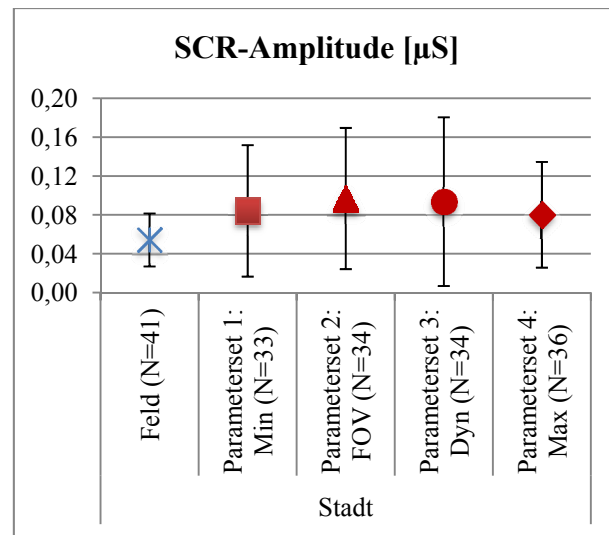


Abbildung 5.26: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „SCR-Amplitude“.

Tabelle 5.23: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „SCR-Amplitude“ in [µS].

	Stadt	
Feld	$\bar{x} = 0,05$	$\sigma = 0,03$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 0,08$	$\sigma = 0,07$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 0,10$	$\sigma = 0,07$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 0,09$	$\sigma = 0,09$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 0,08$	$\sigma = 0,05$

Die SCR-Amplitude fällt als erster der hier betrachteten physiologischen Kennwerte im Feld geringer aus als im Fahrsimulator. Ein Paarvergleich zwischen den beiden Untersuchungsumgebungen zeigt zudem, dass die Abweichungen für alle vier Parametersets signifikant sind (LH₁: $t(31) = -2,750$; $p = 0,010$; LH₂: $z = -4,297$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -3,172$; $p = 0,002$; LH₄: $z = -3,030$; $p = 0,002$). Ein Friedman-Test zur Überprüfung von LH₅ kommt zu dem Ergebnis, dass es keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors Parameterset auf die Daten gibt.

Zumindest für den tonischen Anteil des Hautleitwerts auf Landstraße und Autobahn bestätigt sich das ihm Rahmen der Herzschlagfrequenz angesprochene erhöhte Beanspruchungsniveau der Probanden im Feld. Jedoch erweisen sich hier die Unterschiede zwischen beiden Untersuchungsumgebungen für keines der Parametersets als signifikant. Dies deutet auf absolute Validität beider Kennwerte in beiden Szenarien hin. Für den phasische Anteil der SCR-Amplitude hingegen ergibt sich ein konträres Bild mit signifikant niedrigeren Werten im Feld gegenüber der simulierten Untersuchungsumgebung. Ein Einfluss der Szenerie auf den Hautleitwert als Gesamtgröße gilt somit zwar als belegt (LH₅), zwischen den Parametersets lassen sich jedoch keine Unterschiede bzgl. der Validitätsaussage finden. Die erhöhte Beanspruchung der Probanden im Fahrsimulator Innerorts kann durch eine nicht ausreichend nah am Realfahrzeug ausgelegte Längs- und Querverführung des Fahrsimulators hervorgerufen sein. Gerade bei vielen Abbiegevorgängen sowie Stop-and-Go-Situationen fallen nicht optimal

ausgelegte Fahr Simulatorparameter deutlich auf und erhöhen so ggf. die Beanspruchung des Probanden während der Längs-/Querführung des Fahrzeugs durch die Versuchsstrecke.

Herzschlagvariabilität (rMSSD): (Abbildung 5.27)

Bzgl. der Herzschlagvariabilität werden die zeitbezogenen Kennwerte rMSSD und pNN50 als Beanspruchungsindikatoren herangezogen. Die deskriptiven Werte des rMSSD sind für alle drei Szenerien in Tabelle 5.24 dargestellt.

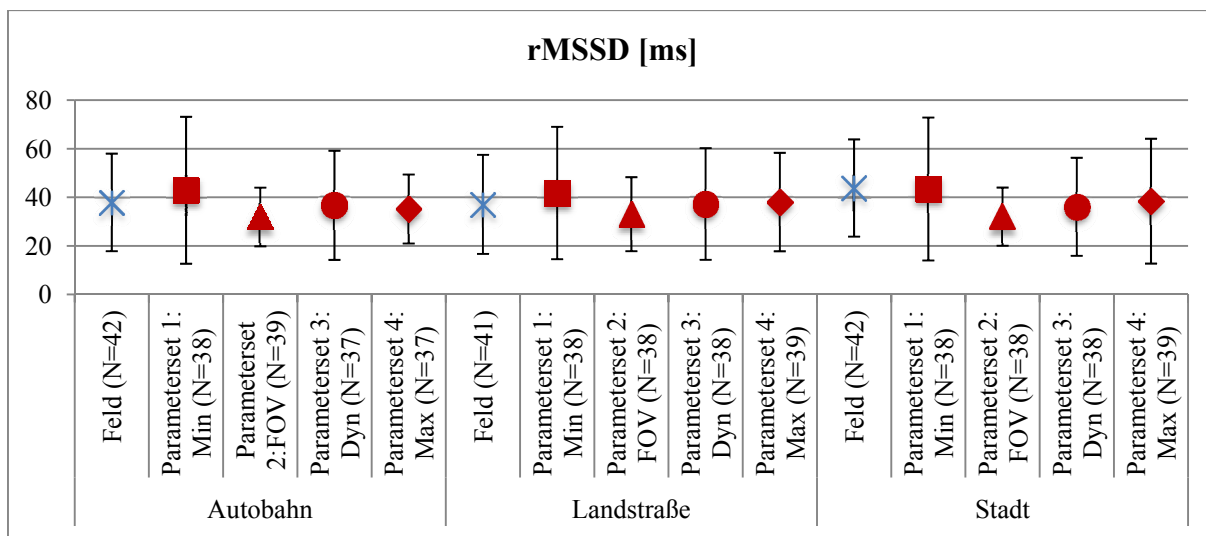


Abbildung 5.27: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „rMSSD“.

Tabelle 5.24: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „rMSSD“ in [ms].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 37,9$	$\sigma = 20,1$	$\bar{x} = 37,1$	$\sigma = 20,4$	$\bar{x} = 43,9$	$\sigma = 20,0$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 42,9$	$\sigma = 30,3$	$\bar{x} = 41,8$	$\sigma = 27,3$	$\bar{x} = 43,5$	$\sigma = 29,4$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 32,0$	$\sigma = 12,1$	$\bar{x} = 33,1$	$\sigma = 15,2$	$\bar{x} = 32,1$	$\sigma = 12,0$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 36,7$	$\sigma = 22,5$	$\bar{x} = 37,3$	$\sigma = 23,0$	$\bar{x} = 36,1$	$\sigma = 20,2$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 35,2$	$\sigma = 14,2$	$\bar{x} = 38,1$	$\sigma = 20,3$	$\bar{x} = 38,5$	$\sigma = 25,7$

Auf der *Autobahn* fällt der Kennwert rMSSD im Feld geringer aus als in Parameterset 1, während die Ergebnisse aller anderen Parametersets unter denen der Realfahrten liegen. Keiner der Vergleiche zwischen realer und simulierter Umgebung erweist sich jedoch bei einem Paarvergleich als signifikant. Ein Indiz für absolute Validität des Kennwerts rMSSD gilt als gegeben.

Bei der *Landstraße* liegen die Ergebnisse von drei der vier Parametersets über dem Mittelwert im Feld. Einzig Parameterset 2 weist eine geringere Beanspruchung bei den Probanden auf als bei der Realfahrt. Ein Wilcoxon-Test zur paarweisen Betrachtung zwischen Feld und Fahr Simulator kommt zu dem Ergebnis, dass keiner der Unterschiede signifikant und somit ein Indiz für absolute Validität gegeben ist.

Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Szenarien weist die Kennwertbetrachtung des rMSSD *Innerorts* zwischen Feld und Parameterset 2 (LH_2 : $z = -3,140$; $p = 0,002$) sowie Parameterset 4 (LH_4 : $z = -2,121$; $p = 0,034$) signifikante Unterschiede auf. In beiden Fällen sind die Probanden im Feld deutlich stärker beansprucht als im Fahrsimulator. Gleichgerichtete, aber nicht signifikant ausfallende Unterschiede ergeben sich für Parameterset 1 und 3.

Für den Kennwert rMSSD zeigt sich ein Unterschied hinsichtlich der betrachteten Untersuchungsszenarien (LH_5). Während die Ergebnisse auf der Autobahn und Landstraße für alle Fahrsimulatorfahrten keine signifikanten Differenzen zum Feld aufweisen und somit ein Indiz für absolute Validität bestätigt wird, zeigt sich Innerorts ein anderes Bild für die Fahrsimulatorfahrten mit erweiterter Sicht, Parameterset 2 und 4. Dies deutet auf einen Einfluss des Parametersets auf die Validitätsergebnisse hin, da die beiden anderen Parametersets keine signifikanten Abweichungen zum Feld aufzeigen. Bei der Interpretation der Kennwerte der Herzschlagvariabilität, zu denen der rMSSD gehört, ist zu beachten, dass eine höhere Variabilität für eine niedrigere Beanspruchung steht. Im Falle von Parameterset 2 und 4 in der Stadt-Szenerie sind die Probanden somit höher beansprucht als im Feld. Dies bestätigt die bereits beim phasischen Hautleitwert identifizierte höhere Beanspruchung im Fahrsimulator für innerstädtische Abschnitte.

Herzschlagvariabilität (pNN50): (Abbildung 5.28)

Als weiterer Kennwert der Herzschlagvariabilität wird der pNN50 betrachtet; die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Szenarien sind in Tabelle 5.25 zusammengefasst.

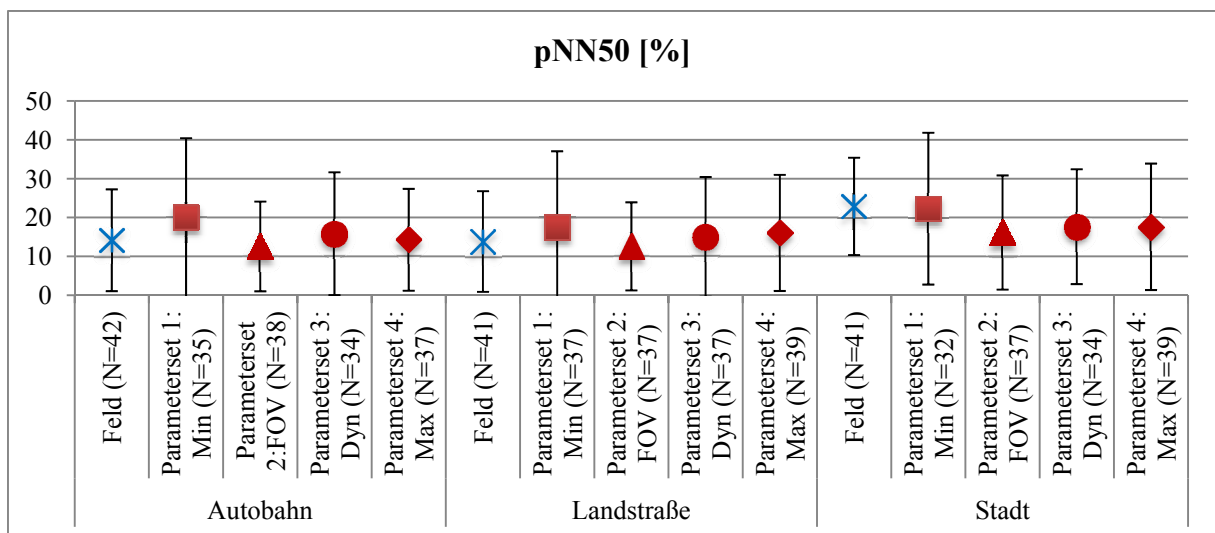


Abbildung 5.28: Deskriptive Ergebnisdarstellung des Kennwerts „pNN50“.

Tabelle 5.25: Mittelwert und Standardabweichung des Kennwerts „pNN50“ in [%].

	Autobahn		Landstraße		Stadt	
Feld	$\bar{x} = 14,2$	$\sigma = 13,1$	$\bar{x} = 13,8$	$\sigma = 13,0$	$\bar{x} = 22,9$	$\sigma = 12,5$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 20,0$	$\sigma = 20,4$	$\bar{x} = 17,5$	$\sigma = 19,6$	$\bar{x} = 22,3$	$\sigma = 19,5$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 12,6$	$\sigma = 11,5$	$\bar{x} = 12,6$	$\sigma = 11,3$	$\bar{x} = 16,2$	$\sigma = 14,7$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 15,9$	$\sigma = 15,8$	$\bar{x} = 15,0$	$\sigma = 15,4$	$\bar{x} = 17,7$	$\sigma = 14,8$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 14,3$	$\sigma = 13,1$	$\bar{x} = 16,1$	$\sigma = 14,9$	$\bar{x} = 17,6$	$\sigma = 16,3$

Für die *Autobahn* zeigt sich im Feld ein Mittelwert, der von keinem der Kennwerte aus simulierter Umgebung signifikant abweicht. Für diesen Beanspruchungskennwert kann demnach ein Indiz auf absolute Validität bestätigt werden.

Auch auf der *Landstraße* zeigt sich auf den ersten Blick kein großer Unterschied zwischen der Beanspruchung im Feld und in den vier Parametersets in simulierter Umgebung. Entsprechend lässt sich auch im Zuge der statistischen Überprüfung mittels eines Paarvergleichs kein signifikantes Ergebnis zwischen Feld und Fahrsimulator identifizieren. Ein Indiz für absolute Validität wird auch für die Landstraße bestätigt.

Innerorts fällt die Betrachtung des Kennwerts pNN50 hingegen unterschiedlich aus. Hier liegt der Kennwert im Feld signifikant über den Werten in Parameterset 2 (LH₂: $z = -2,074$; $p = 0,038$) und Parameterset 4 (LH₄: $z = -2,618$; $p = 0,009$). Parameterset 1 und 3 weisen zwar auch eine höhere Beanspruchung bzw. niedrigere Variabilitäten auf als im Feld, diese Unterschiede erweisen sich jedoch als nicht signifikant.

Zusammenfassend lässt sich für den zweiten Herzschlagvariabilitäts-Kennwert ein ähnliches Ergebnis beschreiben wie für den vorherigen. Sowohl auf der Autobahn als auch auf der Landstraße, also auf den Szenarien geringer Komplexität, lässt sich für alle Parametersets absolute Validität zeigen. Einzig Innerorts weichen die Ergebnisse der Fahrten mit erweitertem Sichtwinkel, Parameterset 2 und 4, signifikant vom Feld ab, wiederum mit einer erhöhten Beanspruchung in simulierter Umgebung. Insbesondere Innerorts trägt eine erweiterte Sicht maßgeblich zu einem höheren Realitätsgrad der Fahrt im Fahrsimulator bei, da der Proband erst bei Hinzuschaltung der äußeren Monitore in die Seitenstraßen einsehen und andere, entgegenkommende Fahrzeuge wahrnehmen kann. Dieser erhöhte Realitätsgrad, der auch im Folgenden durch subjektive Datensätze bestätigt wird, trägt vermutlich dazu bei, die Beanspruchung der Probanden zu erhöhen. Es lässt sich demnach ein Einfluss der Szenerie sowie auch des Parametersets zeigen.

Zusammenfassung:

Eine übersichtliche Zusammenstellung der vorgestellten physiologischen Kennwerte und ihrer Hypothesenergebnisse findet sich in Tabelle 5.26.

Im Bereich der physiologischen Kennwerte als Indikatoren für die Beanspruchung der Probanden sticht die Herzschlagrate bei der finalen Ergebnisbetrachtung heraus, da sie für keine Szenerie und kein Parameterset Validität zeigt.

Entsprechendes gilt auch für den Hautleitwert, jedoch nur für die Szenerie Stadt. Hier zeigt sich demnach bereits der Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Validität, da sich der Kennwert auf Autobahn und Landstraße durchaus valide abbilden lässt.

Auch der Einfluss der Gestaltungsparameter zeigt sich für die physiologischen Kennwerte, wie sich anhand der beiden Kennwerte der Herzschlagvariabilität für die Szenerie Stadt zeigen lässt. Während die darüber indizierte Beanspruchung der Probanden bei zwei Parametersets zwischen realer und simulierter Umgebung vergleichbar ist, erweisen sich die Kennwerte bei den beiden anderen Fahrsimulatorkonfigurationen als nicht valide.

Als Besonderheit im Bereich der physiologischen Kennwerten lässt sich hervorheben, dass die Szenerie Stadt meist im Verhältnis der Ergebnisse beider Untersuchungsumgebungen zueinander konträr zu den Szenerien Landstraße und Autobahn ausfällt.

Tabelle 5.26: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesen und statistischen Ergebnisse für die physiologischen Kennwerte (die mit Sternchen(*) markierten und grün hinterlegten Kästchen zeigen einen auf einem 5%-Niveau signifikanten Unterschied zwischen Feld und Fahr Simulator und somit kein Indiz für absolute Validität; das Verhältnis der Ergebnisse aus Feld und Fahr Simulator zueinander wird in Klammern angegeben (<, =, >), A = Autobahn, L = Landstraße, S = Stadt, G = Gesamtszenarie).

Kennwerte	Szenario/ Szenerie	LH ₁		LH ₂		LH ₃		LH ₄	
		Feld - Set 1	Feld - Set 2	Feld - Set 2	Feld - Set 3	Feld - Set 3	Feld - Set 4	Feld - Set 4	
ARHR	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (>)
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (>)
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (>)
ARSCL bzw. SCR-Amplitude	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(>)
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(>)
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	* (<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (<)
rMSSD	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(>)
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (>)
pNN50	A_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
	L_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(<)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	(<)
	S_G	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$	* (>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$	(>)	$\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$	* (>)

5.5 Subjektive Kennwerte

Auch die Ergebnisse der Befragung zum subjektiven Realitätsempfinden werden unter Angabe des Mittelwerts und der Standardabweichung beschrieben und in Abbildung 5.29-Abbildung 5.32 grafisch dargestellt. Zur Beantwortung der einzelnen Fragen standen den Probanden fünfstufige Likert-Skalen zur Verfügung, bei denen der Skalenwert 1 einen sehr geringen Realitätsgrad und Skalenwert 5 einen sehr hohen Realitätsgrad beschreibt. Zusätzlich gab es die Möglichkeit, die Antwort „mal gering, mal hoch“ auszuwählen, die jedoch in den Abbildungen nicht dargestellt wird.

Um den Realitätsgrad der einzelnen abgefragten Aspekte einer Fahrsimulatorfahrt beurteilen zu können, wurden die Probanden um einem Abgleich der im Fahrsimulator gewonnenen Eindrücke mit einer Referenzfahrt im eigenen PKW auf öffentlicher Straße gebeten. So entsteht das in Abbildung 5.30 (links) einzusehende Meinungsbild des Schwierigkeitsgrads der Geschwindigkeitsregelung beispielsweise aus einem Abgleich des Realitätsgrads der im Fahrsimulator erlebten Geschwindigkeitsregelung und den Erfahrungen aus dem eigenen PKW.

Realitätsgrad Simulatorfahrt: (Abbildung 5.29, links)

Zunächst wurden die Probanden nach dem Realitätsgrad der Simulatorfahrt als Ganzes gefragt (Frage C1). Die deskriptiven Daten finden sich in Tabelle 5.27 (links).

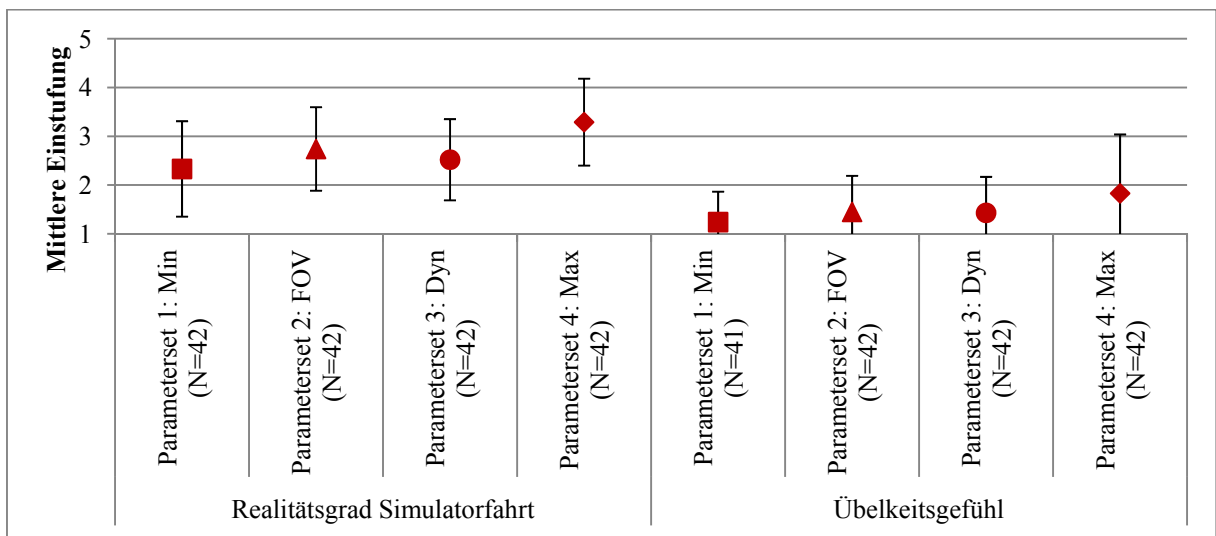


Abbildung 5.29: Deskriptive Ergebnisdarstellung der Kennwerte „Realitätsgrad Simulatorfahrt“ (links) und „Übelkeitsgefühl“ (rechts) (Mittelwert und Standardabweichung jeweils eines Fragebogen-Items, das auf einer fünfstufigen Likert-Skala bewertet wurde; Skalenwert 1 = sehr geringer Realitätsgrad, Skalenwert 5 = sehr hoher Realitätsgrad).

Tabelle 5.27: Mittelwert und Standardabweichung der Kennwerte „Realitätsgrad Simulatorfahrt“ und „Übelkeitsgefühl“ in Skalenpunkten.

	Realitätsgrad Simulatorfahrt		Übelkeitsgefühl	
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 2,3$	$\sigma = 1,0$	$\bar{x} = 1,2$	$\sigma = 0,6$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 2,7$	$\sigma = 0,9$	$\bar{x} = 1,4$	$\sigma = 0,7$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 2,5$	$\sigma = 0,8$	$\bar{x} = 1,4$	$\sigma = 0,7$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 3,3$	$\sigma = 0,9$	$\bar{x} = 1,8$	$\sigma = 1,2$

Eine Varianzanalyse mit Hilfe des Friedman Tests ergibt für den subjektiv eingestuften Realitätsgrad der Fahrsimulatorfahrt einen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors und somit des Parametersets (LHR: $\chi^2(3) = 26,833$; $p = 0,000$). Eine Post-hoc-Analyse zeigt, dass zwischen Parameterset 1 und 2 ($p = 0,003^b$), 1 und 4 ($p = 0,000^b$), 2 und 4 ($p = 0,004^b$) sowie 3 und 4 ($p = 0,000^b$) ein signifikanter Unterschied besteht.

Dieses Ergebnis spiegelt die Erwartungen wieder, dass der Realitätsgrad einer Fahrt im Fahrsimulator mit steigender Parameterausstattung zunimmt. Dabei führt die Erweiterung des Sichtwinkels horizontal sowohl im statistischen (Parameterset 1 zu 2) als auch im dynamischen Fahrsimulator (Parameterset 3 zu 4) zu einer signifikant besser beurteilten Realitätsempfindung. Für die Hinzuschaltung der Bewegungsplattform zeigt sich zumindest für einen Fahrsimulator mit 180° FOV horizontal eine signifikante Steigerung des Realitätsgrads (Parameterset 2 zu 4). Hinsichtlich der subjektiven Beurteilung einer Simulatorfahrt durch einen Probanden lässt sich zusammenfassend eine Tendenz erkennen, dass diese direkt mit der physikalischen Ausstattung eines Fahrsimulators zusammenhängt.

Übelkeitsgefühl: (Abbildung 5.29, rechts)

Eine weitere Frage bezieht sich auf das von den Probanden wahrgenommene Übelkeitsgefühl während der Fahrt, welches ein Indiz für das Auftreten der Fahrsimulorkrankheit sein kann (Frage C5). Die Mittelwerte und Standardabweichungen dieses Kennwerts finden sich in Tabelle 5.27 (rechts).

Auch hier zeigt die Varianzanalyse nach Friedman einen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors (LHR: $\chi^2(3) = 8,079$; $p = 0,044$), wobei nur zwischen Parameterset 1 und 4 ein signifikanter Unterschied identifiziert wird ($p = 0,009^b$).

Das Ergebnis dieser Kennwertbetrachtung ist überraschend, da das dynamische Parameterset 4 mit einem höheren Übelkeitsgefühl in Verbindung gebracht wird als Parameterset 1, obwohl dies eine statische Simulatoreausführung darstellt. Laut Literatur tritt Fahrsimulatorübelkeit in einem dynamischen Simulator weniger häufig auf als in einem statischen. Für die hier erhaltenen Ergebnisse lassen sich zwei Erklärungsansätze finden. Zum einen unterscheiden sich Parameterset 1 und 4 nicht nur durch die Bewegungssimulation, sondern auch durch den FOV horizontal; dieser ist bei Parameterset 4 größer. Eine Ausweitung des Sichtwinkels horizontal führt zu einer Zunahme der Gefahr von Simulatorübelkeit. Neben diesem Grund kann auch

die eingeschränkte Performance der Bewegungsplattform zu der Ergebnisausprägung beitragen, wonach hinsichtlich des Übelkeitsgefühls keine Plattform besser ist als eine Plattform mit begrenzten Leistungsdaten.

Im Folgenden wird spezifischer auf einzelne Fahr Simulator-Komponenten bzw. die Einstufung der realistischen Wiedergabe bestimmter Fahrzeugreaktionen, gemessen an einer Referenzfahrt im eigenen PKW auf öffentlicher Straße, eingegangen.

Schwierigkeit Geschwindigkeitsregelung: (Abbildung 5.30, links)

Die subjektiv eingeschätzte Schwierigkeit der Geschwindigkeitsregelung (Frage C7) findet sich grafisch veranschaulicht in Abbildung 5.30 (links); die deskriptiven Daten sind Tabelle 5.28 (links) zu entnehmen.

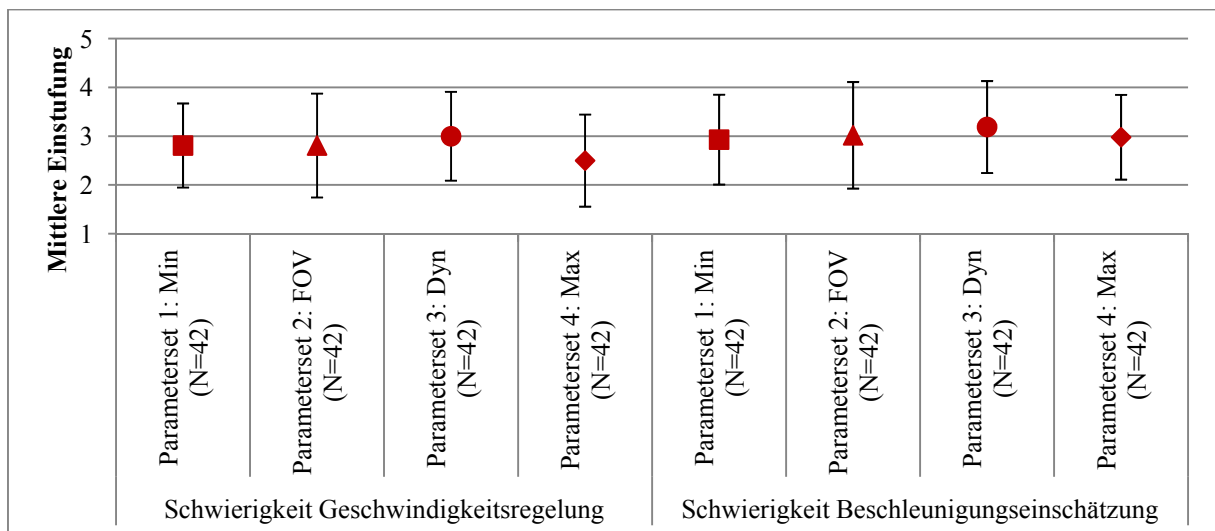


Abbildung 5.30: Deskriptive Ergebnisdarstellung der Kennwerte „Schwierigkeit Geschwindigkeitsregelung“ (links) und „Schwierigkeit Beschleunigungseinschätzung“ (rechts) (Mittelwert und Standardabweichung jeweils eines Fragebogen-Items, das auf einer fünfstufigen Likert-Skala bewertet wurde; Skalenwert 1 = sehr geringer Realitätsgrad, Skalenwert 5 = sehr hoher Realitätsgrad).

Tabelle 5.28: Mittelwert und Standardabweichung der Kennwerte „Schwierigkeit Geschwindigkeitsregelung“ und „Schwierigkeit Beschleunigungseinschätzung“ in Skalenpunkten.

	Schwierigkeit Geschwindigkeitsregelung		Schwierigkeit Beschleunigungseinschätzung	
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 2,8$	$\sigma = 0,9$	$\bar{x} = 2,9$	$\sigma = 0,9$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 2,8$	$\sigma = 1,1$	$\bar{x} = 3,0$	$\sigma = 1,1$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 3,0$	$\sigma = 0,9$	$\bar{x} = 3,2$	$\sigma = 0,9$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 2,5$	$\sigma = 0,9$	$\bar{x} = 3,0$	$\sigma = 0,9$

Im Rahmen des Friedman Tests zur statistischen Überprüfung kann kein Einfluss des Messwiederholungsfaktors auf die Schwierigkeit der Geschwindigkeitsregelung aufgedeckt werden.

Die Geschwindigkeitsregelung wird von den Probanden nicht signifikant unterschiedlich eingestuft, trotz verschieden großer Sichtwinkel horizontal. Es zeigt sich lediglich eine leichte Tendenz zur einfacher empfundenen Geschwindigkeitsregelung in Parameterset 4 gegenüber Parameterset 3.

Schwierigkeit Beschleunigungseinschätzung: (Abbildung 5.30, rechts)

Eine ähnliche Frage bezieht sich auf die Schwierigkeit der Beschleunigungseinschätzung (Frage C8), deren Ergebnisse in Abbildung 5.30 (rechts) veranschaulicht sind. Die deskriptiven Daten finden sich in Tabelle 5.28 (rechts).

Eine statistische Überprüfung auf einen möglichen Einfluss des Messwiederholungsfaktors zeigt auch bei diesem Kennwert kein signifikantes Ergebnis.

Bei der Betrachtung dieses Ergebnisses bestätigt sich die obige Vermutung, dass sich die eingeschränkte Performance der Bewegungsplattform nachteilhaft auf die Realitätsempfindung der Probanden auswirkt. Sie führt auch hier bei einem Vergleich zwischen Set 1 und 3 zu dem Ergebnis, dass ein statischer Fahrsimulator realitätsnäher eingestuft wird als die dynamische Ausführung.

Schwierigkeit Abstandseinschätzung: (Abbildung 5.31, links)

Mit der Frage C9 wird die Schwierigkeit der Abstandseinschätzung (Abbildung 5.31, links) abgefragt. Die deskriptiven Daten finden sich in Tabelle 5.29 (links).

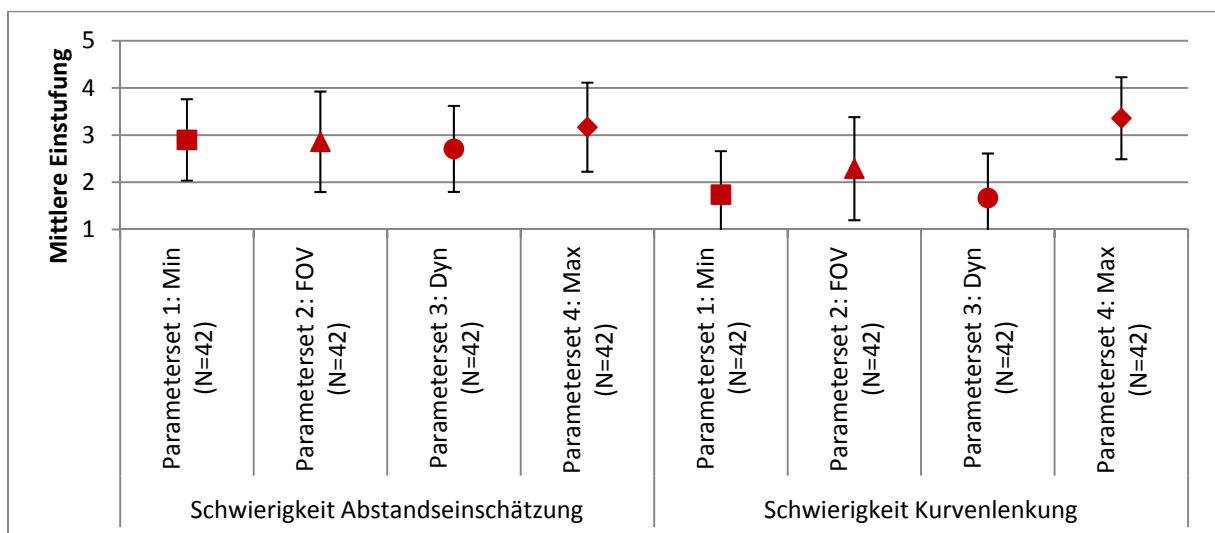


Abbildung 5.31: Deskriptive Ergebnisdarstellung der Kennwerte „Schwierigkeit Abstandseinschätzung“ (links) und „Schwierigkeit Kurvenlenkung“ (rechts) (Mittelwert und Standardabweichung jeweils eines Fragebogen-Items, das auf einer fünfstufigen Likert-Skala bewertet wurde; Skalenwert 1 = sehr geringer Realitätsgrad, Skalenwert 5 = sehr hoher Realitätsgrad).

Tabelle 5.29: Mittelwert und Standardabweichung der Kennwerte „Schwierigkeit Abstandseinschätzung“ und „Schwierigkeit Kurvenlenkung“ in Skaleneinheiten.

	Schwierigkeit Abstandseinschätzung		Schwierigkeit Kurvenlenkung	
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 2,9$	$\sigma = 1,0$	$\bar{x} = 1,7$	$\sigma = 0,9$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 2,9$	$\sigma = 1,0$	$\bar{x} = 2,3$	$\sigma = 0,9$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 2,7$	$\sigma = 1,1$	$\bar{x} = 1,7$	$\sigma = 0,7$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 3,2$	$\sigma = 0,9$	$\bar{x} = 3,4$	$\sigma = 1,1$

Für den Kennwert „Schwierigkeit Abstandseinschätzung“ liegt, ebenso wie für die vorherigen subjektiven Betrachtungen, kein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors vor.

Es zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Parametersets hinsichtlich des subjektiv empfundenen Realitätsgrads der Abstandseinschätzung. Dabei wird aufgrund bisheriger Literaturerkenntnisse erwartet, dass die Abstandseinschätzung mit größerem Sichtwinkel erleichtert wird. Dies kann jedoch nicht bestätigt werden. Abhilfe könnte hier eine dreidimensionale Sichtsimulation schaffen, über die die Tiefenwahrnehmung der Probanden stark verbessert würde.

Schwierigkeit Kurvenlenkung: (Abbildung 5.31, rechts)

Der Schwierigkeitsgrad, den Probanden bei Ein- und Auslenken in Kurven empfinden (Frage C12), wird ebenfalls abgefragt. Eine grafische Illustration der Ergebnisse findet sich in Abbildung 5.31 (rechts), während Tabelle 5.29 (rechts) die wesentlichen deskriptiven Werte enthält.

Der Einfluss des Parametersets und somit des Messwiederholungsfaktors erweist sich hier als signifikant ($LH_R: \chi^2(3) = 54,934; p = 0,000$). Der Post-hoc Wilcoxon-Test ergibt zwischen Parameterset 1 und 2 ($p = 0,001^b$), 1 und 4 ($p = 0,000^b$), 2 und 3 ($p = 0,000^b$), 2 und 4 ($p = 0,000^b$) sowie 3 und 4 ($p = 0,000^b$) einen signifikanten Unterschied.

Zwar zeigt sich, wie erwartet, ein Einfluss des Parametersets auf den subjektiv empfundenen Schwierigkeitsgrad der Kurvenlenkung, dieser fällt jedoch entgegen den Erwartungen aus. Eine Erweiterung des Sichtwinkels horizontal (Parameterset 1 zu 2 bzw. Parameterset 3 zu 4) erhöht im vorliegenden Fall die von den Probanden eingestufte Schwierigkeit der Kurvenlenkung. Dies kann vor allem Innerorts bei engen Kurven an der nicht optimal abgestimmten Force-Feedback Lösung des Lenkrads liegen. Während die Probanden bei nur einem Monitor den Kurvenverlauf kaum einsehen können, können sie bei erweitertem Sichtwinkel die Straße länger einsehen und merken so selbst kleine Schwierigkeiten in der Kurvenhaltung. Auch eine Hinzuschaltung des Hexapods bei bereits erweiterter Sicht (Parameterset 2 zu 4) erhöht für die Probanden die Schwierigkeit der Kurvenlenkung. Hier kann wiederum die eingeschränkte Performance der Bewegungsplattform als Erklärung gesehen werden.

Realitätsgrad Größe der Projektionsfläche: (Abbildung 5.32, links)

Es werden ferner Fragen gezielt zur Variation der Gestaltungsparameter gestellt. Die Einstufung des Realitätsgrads der Größe der Projektionsfläche (Frage C19) findet sich in Abbildung 5.32 (links). Die deskriptiven Werte finden sich entsprechend in Tabelle 5.30 (links).

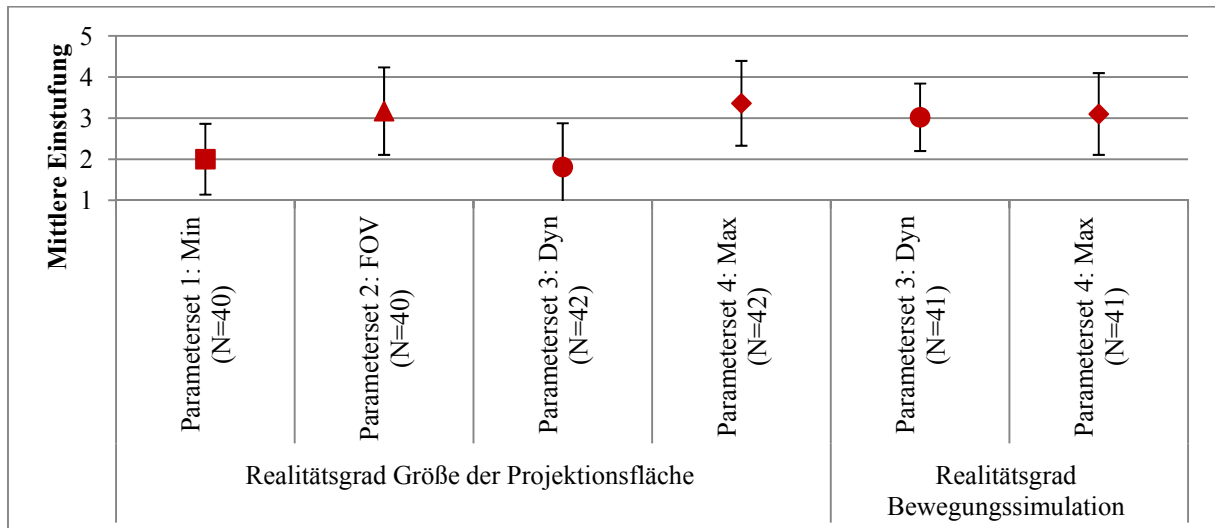


Abbildung 5.32: Deskriptive Ergebnisdarstellung der Kennwerte „Realitätsgrad Größe der Projektionsfläche“ (links) und „Realitätsgrad Bewegungssimulation“ (rechts) (Mittelwert und Standardabweichung jeweils eines Fragebogen-Items, das auf einer fünfstufigen Likert-Skala bewertet wurde; Skalenwert 1 = sehr geringer Realitätsgrad, Skalenwert 5 = sehr hoher Realitätsgrad).

Tabelle 5.30: Mittelwert und Standardabweichung der Kennwerte „Realitätsgrad Größe der Projektionsfläche“ und „Realitätsgrad Bewegungssimulation“ in Skalenpunkten.

	Realitätsgrad Größe der Projektionsfläche		Realitätsgrad Bewegungssimulation	
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 2,0$	$\sigma = 0,8$	-	-
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 3,2$	$\sigma = 1,0$	-	-
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 1,8$	$\sigma = 1,1$	$\bar{x} = 3,0$	$\sigma = 0,8$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 3,4$	$\sigma = 1,0$	$\bar{x} = 3,1$	$\sigma = 1,0$

Der Einfluss des Messwiederholungsfaktors auf den Kennwert „Realitätsgrad Größe der Projektionsfläche“ wird als signifikant identifiziert ($LH_R: \chi^2(3) = 57,215; p = 0,000$), wobei der Unterschied zwischen Parameterset 1 und 2 ($p = 0,000^b$), 1 und 4 ($p = 0,000^b$), 2 und 3 ($p = 0,000^b$) sowie 3 und 4 ($p = 0,000^b$) Signifikanz aufweist.

Hier zeigen sich die erwarteten Ergebnisse, dass der Realitätsgrad der Größe der Projektionsfläche mit steigendem FOV zunimmt. Sowohl für den statischen als auch für den dynamischen Fahrsimulator lässt sich eine signifikante Steigerung dieses Kennwerts bei Erweiterung von 60° auf 180° erkennen.

Realitätsgrad Bewegungssimulation: (Abbildung 5.32, rechts)

Der Realitätsgrad der Bewegungssimulation hingegen wird nur in den dynamischen Parametersets 3 und 4 abgefragt (Frage C20). Eine grafische Darstellung der Ergebnisse findet sich in Abbildung 5.32 (rechts); die deskriptiven Werte sind in Tabelle 5.30 (rechts) einzusehen.

Ein Wilcoxon-Test zwischen diesen beiden Mittelwerten ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen dem beurteilten Realitätsgrad eines dynamischen Fahrsimulators mit eingeschränkter Sicht (Parameterset 3) und erweiterter Sicht (Parameterset 4).

Zusammenfassung:

Die vorgestellten Ergebnisse der subjektiven Kennwerte sind noch einmal übersichtlich und mit direktem Bezug zur jeweiligen Untersuchungshypothese in Tabelle 5.31 dargestellt.

Tabelle 5.31: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesen und statistischen Ergebnisse für die subjektiven Kennwerte (die mit Sternchen(*) markierten und grün hinterlegten Kästchen zeigen einen auf einem 5%-Niveau signifikanten Unterschied zwischen den Fahrsimulator-Parametersets; das Verhältnis der Ergebnisse aus den betrachteten Parametersets zueinander wird in Klammern angegeben (<, =, >), FOV = Field of view bzw. Sichtwinkel horizontal, Dyn = Dynamik).

Kennwerte	Einfluss FOV				Einfluss DYN			
	Set 1 – Set 2		Set 3 – Set 4		Set 1 – Set 3		Set 2 – Set 4	
Realitätsgrad Simulatorfahrt	$\mu_{Set1} < \mu_{Set2}$	* ($<$)	$\mu_{Set3} < \mu_{Set4}$	* ($<$)	$\mu_{Set1} < \mu_{Set3}$	($<$)	$\mu_{Set2} < \mu_{Set4}$	* ($<$)
Übelkeitsgefühl	$\mu_{Set1} < \mu_{Set2}$	($<$)	$\mu_{Set3} < \mu_{Set4}$	($<$)	$\mu_{Set1} > \mu_{Set3}$	($<$)	$\mu_{Set2} > \mu_{Set4}$	($<$)
Schwierigkeit Geschwindigkeitsregelung	$\mu_{Set1} > \mu_{Set2}$	($=$)	$\mu_{Set3} > \mu_{Set4}$	($>$)	-		-	
Schwierigkeit Beschleunigungseinschätzung	-		-		$\mu_{Set1} > \mu_{Set3}$	($<$)	$\mu_{Set2} > \mu_{Set4}$	($=$)
Schwierigkeit Abstandseinschätzung	$\mu_{Set1} > \mu_{Set2}$	($=$)	$\mu_{Set3} > \mu_{Set4}$	($<$)	-		-	
Schwierigkeit Kurvenlenkung	$\mu_{Set1} > \mu_{Set2}$	* ($<$)	$\mu_{Set3} > \mu_{Set4}$	* ($<$)	$\mu_{Set1} > \mu_{Set3}$	($=$)	$\mu_{Set2} > \mu_{Set4}$	* ($<$)
Realitätsgrad Größe d. Projektionsfläche	$\mu_{Set1} < \mu_{Set2}$	* ($<$)	$\mu_{Set3} < \mu_{Set4}$	* ($<$)	-		-	
Realitätsgrad Bewegungssimulation	-		$\mu_{Set3} < \mu_{Set4}$	($<$)	-		-	

Im Unterschied zu den bisherigen Ergebniszusammenfassungen der anderen Kennwertkategorien lassen sich im Falle der subjektiven Kennwerte keine Aussagen zur Validität treffen, da hier lediglich ein Vergleich zwischen Fahrsimulator-Parametersets stattfindet.

Die Ergebnisbetrachtung zeigt, dass die Annahme des mit einer Erweiterung der Gestaltungsparameter zunehmenden Realitätsgrads der Simulatorfahrt als weitestgehend berechtigt gilt. Lediglich für einen Parameterset-Vergleich zeigt sich hier zwar eine geringe, jedoch keine signifikante Verbesserung.

Für die ferner abgefragten einzelnen Aspekte zum Realitätsgrad, wie die Schwierigkeit der Geschwindigkeitsregelung oder der Kurvenlenkung, zeigen sich keine eindeutigen gerichteten

Ergebnisse. Für die zwei variierten Gestaltungsparameter führt die Einzelbetrachtung hingegen wieder zu der angenommenen zunehmenden Realitätsnähe bei Gestaltungsparameter-Erweiterung. Während der Realitätsgrad der Größe der Projektionsfläche signifikant steigt, zeigt sich bzgl. des Realitätsgrads der Bewegungssimulation zumindest eine Tendenz in die entsprechende Richtung.

5.6 Aggregierte Ergebnisdarstellung im Modell

Die zuvor getrennt nach Kennwertkategorien dargestellten Ergebnisse der Validierungsstudie werden nun, nach den Szenarien Autobahn, Landstraße und Stadt aggregiert, in das entwickelte Modell (Kap. 3) eingetragen (Abbildung 5.33 - Abbildung 5.35). So erfolgt ein Abgleich der theoretisch getroffenen Annahmen und der empirisch belegten Zusammenhänge zwischen einzelnen Gestaltungsparameter-Ausweitungen und den Validitätskennwerten.

Aus der graphischen Darstellung kann entnommen werden, inwieweit eine Erweiterung der Fahrsimulatorparameter eine Änderung hinsichtlich der erzielbaren Validität einzelner Kennwerte bewirkt (LH₁-LH₄). Dabei kann die Änderung drei Ausprägungen annehmen:

- **Schwarzer Pfeil:** Eine Erweiterung der Gestaltungsparameter wirkt sich *neutral* auf das Validitätsergebnis eines Kennwerts aus. Vor und nach der Erweiterung werden gleiche valide Ergebnisse erzielt.
- **Roter Pfeil:** Eine Erweiterung der Gestaltungsparameter wirkt sich *negativ* auf das Validitätsergebnis eines Kennwerts aus. Während vor der Erweiterung valide Ergebnisse erzielt wurden, kann nach der Erweiterung kein Indiz auf Validität mehr bestätigt werden.
- **Grüner Pfeil:** Eine Erweiterung der Gestaltungsparameter wirkt sich *positiv* auf das Validitätsergebnis eines Kennwerts aus. Während vor der Erweiterung keine validen Ergebnisse erzielt wurden, kann nach der Erweiterung ein Indiz auf Validität bestätigt werden.

Ausgehend von einem Minimalaufbau eines Fahrsimulators (Parameterset 1: statisch, 60° FOV horizontal), berücksichtigt das Modell sowohl die Auswirkungen einer gezielten Erweiterung des Sichtwinkels horizontal (Parameterset 2: statisch, 180° FOV horizontal) bzw. der Bewegungssimulation (Parameterset 3: dynamisch, 60° FOV horizontal) als auch Auswirkungen einer parallelen Erweiterung beider Gestaltungsparameter (Parameterset 4: dynamisch, 180° FOV horizontal). Diese Erweiterungen sind über die Kästchen „FOV horizontal“, „Bewegung“ und „Bewegung & FOV horizontal“ beschrieben. Als Zielgrößen dieser Auswirkungen sind alle in der Untersuchungsreihe erhobenen Kennwerte im Bereich der Fahrdynamik, des Fahrerverhaltens sowie der Physiologie enthalten. Dabei werden Kennwerte, die für einzelne Szenarien nicht ausgewertet wurden, ausgegraut, um die Ergebnisinterpretation eindeutig zu ermöglichen. Kennwerte, auf die kein Einfluss einer Gestaltungsparameter-Erweiterung dargestellt wird (keine ankommende Pfeilspitze), sind demnach entweder nicht in der Auswertung berücksichtigt (grau geschriebener Kennwert) oder aber für den Kennwert wurde

sowohl vor als auch nach der Gestaltungsparametererweiterung keine Validität erzielt (schwarz geschriebener Kennwert).

Abbildung 5.33 zeigt das entsprechende Ergebnis für die Szenerie *Autobahn*.

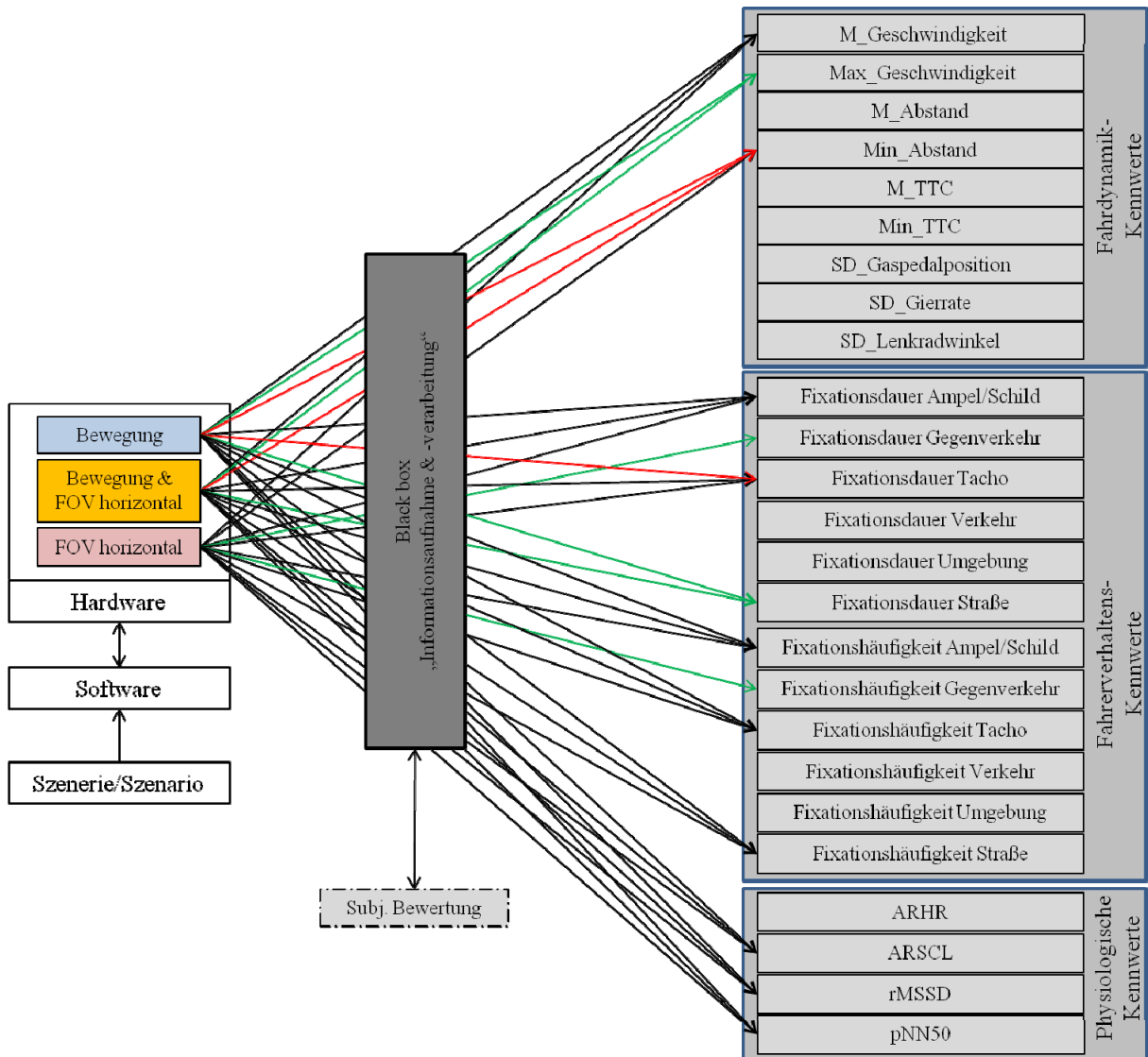


Abbildung 5.33: Evaluiertes Modell für die Szenerie *Autobahn*.

Für insgesamt 11 der 25 ausgewerteten Kennwerte kann hier, unabhängig von der Gestaltungsparameter-Erweiterung, kein Indiz für Validität bekundet werden: mittlerer Abstand; mittlere und minimale TTC; Standardabweichung der Gaspedalposition, der Gierrate sowie des Lenkradwinkels; Fixationsdauer/-häufigkeit auf die AOIs „Verkehr“ und „Umgebung“; Arbeitsherzschlagfrequenz.

Für drei Kennwerte führt eine Gestaltungsparameter-Erweiterung sogar zu einer Verschlechterung der Ergebnisse, sodass keine Validität mehr vorliegt. Ein Minimalaufbau erzielt in diesem Fall also ein besseres Ergebnis im Sinne der Validität als ein erweiterter Aufbau. Dabei wurde stets die Bewegungssimulation hinzugeschaltet, sodass davon ausgegangen werden

kann, dass die begrenzte Performance des Hexapod eine Ursache für dieses Ergebnis ist. Auf diese Thematik wird im nächsten Abschnitt vertiefend eingegangen.

Demgegenüber ergeben sich sechs Mal Verbesserungen einzelner Kennwerte durch eine Gestaltungsparameter-Erweiterung, sodass diese anschließend ein Indiz für Validität liefern. Hierbei lässt sich vor allem eine positive Auswirkung der Erweiterung des Sichtwinkels horizontal auf das Blickverhalten der Probanden bzw. dessen Validität erkennen. Dieser Zusammenhang entspricht den ursprünglichen Überlegungen und erscheint naheliegend.

Abbildung 5.34 zeigt das entsprechende Ergebnis für die Szenerie *Landstraße*.

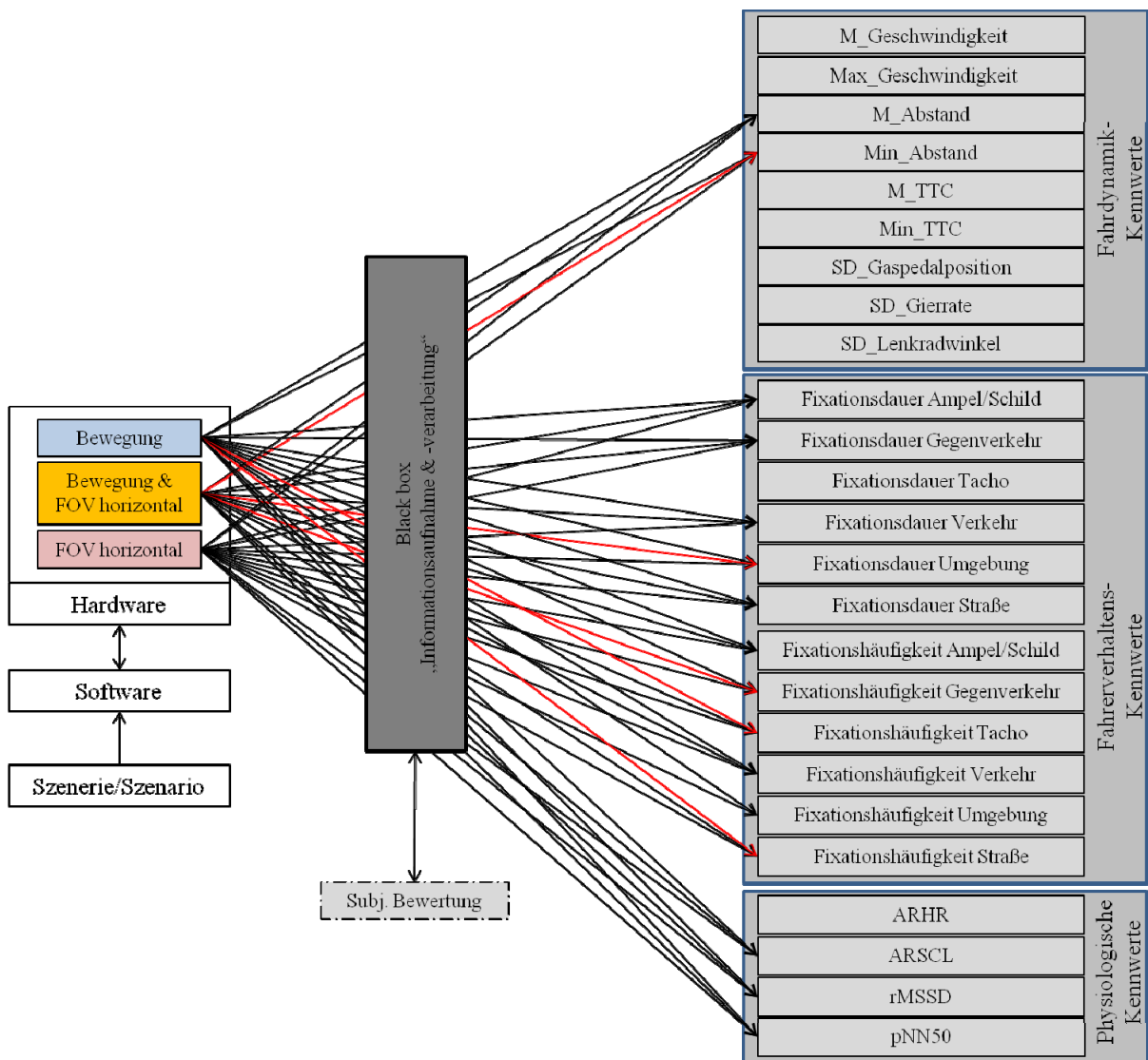


Abbildung 5.34: Evaluiertes Modell für die Szenerie *Landstraße*.

Hier kann für 9 der insgesamt 25 ausgewerteten Kennwerte, unabhängig von der Gestaltungsparameter-Erweiterung, kein Indiz für Validität bekundet werden: mittlere und maximale Geschwindigkeit; mittlere und minimale TTC; Standardabweichung der Gaspedalposition, der

Gierrate sowie des Lenkradwinkels; Fixationsdauer auf das AOI „Tacho“; Arbeitsherzschlagfrequenz.

Bei der Szenerie Landstraße führt eine Gestaltungsparameter-Erweiterung in fünf Fällen zu einer Verschlechterung der Ergebnisse, sodass nach der Erweiterung keine Validität mehr erzielt wird, während ein Minimalaufbau valide Ergebnisse erbringt. In vier von fünf Fällen handelt es sich um eine gekoppelte Erweiterung von Bewegung und FOV horizontal. Es liegt daher nahe, dass die von Sicht- und Bewegungssimulation ausgehenden Reize nicht ausreichend aufeinander abgestimmt sind und sich somit eine Disharmonie ergibt, die der Proband wahrnimmt und die insbesondere sein Blickverhalten auf der Landstraße beeinflusst. Demgegenüber wirkt sich eine reine Erweiterung der Bewegungssimulation in dieser Szenerie nicht negativ auf einen Fahrdynamikkennwert aus, wie es im Falle der Autobahn ist. Auf einer einstreifigen Landstraße hält der Proband seine Geschwindigkeit meist sehr konstant, sodass Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge wie z. B. bei einem Spurwechsel kaum vorkommen und entsprechend keine Kräftedarstellung notwendig ist.

In keinem Fall kann eine Verbesserung eines Kennwerts durch eine Gestaltungsparameter-Erweiterung verbucht werden. Für eine Szenerie wie die Landstraße, auf der sowohl der Sichtwinkel horizontal als auch die Bewegungssimulation aufgrund der Streckengestaltung von nur eingeschränkter Relevanz sind, ist es nachvollziehbar, dass ein Minimalaufbau ein ebenso gutes Ergebnis wie der hier getestete Maximalaufbau liefert.

Abbildung 5.35 zeigt das Modell für die Szenerie *Stadt*.

Innerorts werden einige Fahrdynamikkennwerte nicht ausgewertet, da deren Relevanz für diese Szenerie als gering eingestuft wird. Für die insgesamt 19 ausgewerteten Kennwerte kann in acht Fällen, unabhängig von der Gestaltungsparameter-Erweiterung, kein Indiz für Validität festgestellt werden: mittlere Geschwindigkeit; Standardabweichung des Lenkradwinkels; Fixationsdauer/-häufigkeit auf die AOIs „Tacho“ und „Verkehr“; Arbeitsherzschlagfrequenz.

Bei der Szenerie Stadt lassen sich deutlich mehr Verschlechterungen durch eine Gestaltungsparameter-Erweiterung erkennen. In immerhin 16 Fällen erzielt hier wiederum ein Minimalaufbau ein besseres Ergebnis im Sinne der Validität als ein erweiterter Aufbau. Die Verschlechterungen betreffen dabei insbesondere Fahrerhaltenskennwerte und physiologische Kennwerte. Dem kann gegenüber gestellt werden, dass sich Fahrerhaltenskennwerte zumindest in sechs Fällen durch eine Gestaltungsparameter-Erweiterung in Richtung Validität verbessern. Einzig für die Beanspruchung der Probanden ist somit allgemein von einer Verschlechterung der Validitätsergebnisse durch eine Gestaltungsparameter-Erweiterung auszugehen. Für die Szenerie Stadt ergeben sich ohnehin nur zwei der vier physiologischen Kennwerte einmal als valide und zwar im Falle des Minimalaufbaus. Dabei liegt die Beanspruchung der Probanden im Fahrsimulator teilweise höher als die im Feld (Herzschlagrate), aber

teilweise auch unter der im Feld (Hautleitwert und Herzschlagvariabilität). Es lässt sich somit keine eindeutige Richtung und Aussage aus den Ergebnissen gewinnen.

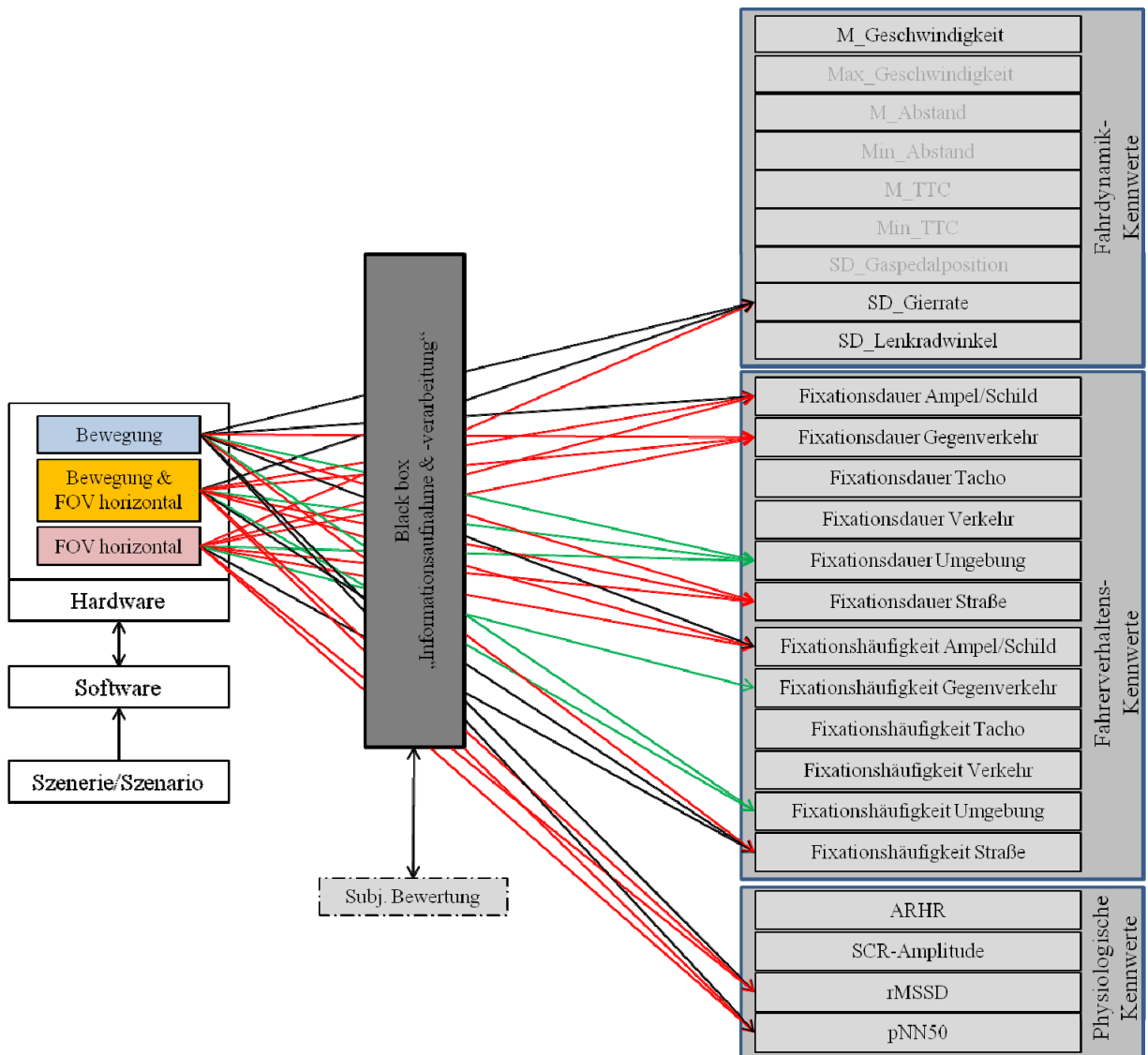


Abbildung 5.35: Evaluiertes Modell für die Szenerie Stadt.

Die vorangegangenen Ausführungen für die einzelnen Szenarien zeigen Abweichungen zwischen den empirisch gewonnenen Ergebnissen und den theoretischen Modellannahmen. Nachfolgend wird auf mögliche Erklärungsansätze für diese Differenzen eingegangen.

6 Diskussion

Diese Arbeit verfolgt das grundlegende Ziel, den Zusammenhang zwischen einer sukzessiven Variation der Fahrsimulator-Hardwarekonfiguration und den in simulierter Umgebung erzielbaren Validitätsergebnissen einzelner Kennwerte in Abhängigkeit konkreter Szenarien zu quantifizieren. Dazu werden mithilfe der empirischen Untersuchungsreihe die in der Modellbildung theoretisch hergeleiteten Zusammenhänge der Einflussfaktoren Untersuchungsszenario und Gestaltungsparameter auf Validitätskennwerte evaluiert.

Zunächst wird auf die Untersuchungs- und Auswertemethodik Bezug genommen, die der Studie zugrunde liegen. Im Anschluss daran wird das aufgestellte Modell vor dem Hintergrund der Untersuchungsergebnisse kritisch betrachtet und die gewonnenen Erkenntnisse werden diskutiert.

6.1 Methodikdiskussion

Nachfolgend wird die zugrundeliegende Methodik der empirischen Studie kritisch betrachtet. Die genannten Aspekte können zur Erklärung einer Abweichung zwischen den empirischen Ergebnissen und der Modellbetrachtung sowie auch einer Abweichung zwischen den empirischen Ergebnissen und den bisherigen Erkenntnissen anderer Validierungsstudien beitragen.

Die Diskussion findet getrennt nach den Kennwertkategorien statt. Hierbei werden die einzelnen angesprochenen Aspekte jeweils der Kategorie zugeordnet, bei der die größte Beeinflussung erwartet wird. Dennoch können auch andere Kategorien von dem jeweiligen Aspekt betroffen sein. Schließlich erfolgt noch eine Gesamtbetrachtung der Methodik.

Fahrdynamikkennwerte

Erste Diskussionspunkte, insbesondere die Fahrdynamikkennwerte betreffend, ergeben sich hinsichtlich der Gestaltung der Versuchsstrecke. Zwar ist die Versuchsstrecke im Fahrsimulator nah an der realen Versuchsstrecke modelliert, jedoch weisen beide Strecken unterschiedliche Verkehrsdichten auf. Zur Festlegung der in SILAB zu modellierenden Verkehrsteilnehmer wurde die reale Strecke zu unterschiedlichen Tageszeiten abgefahren und ein Mittelwert über die verzeichnete Verkehrsteilnehmerzahl gebildet. Bei der späteren Datenauswertung zeigt sich jedoch, dass die Verkehrsdichte im Feld beim innerstädtischen Bereich deutlich über der im Fahrsimulator lag, während auf der Landstraße ein umgekehrtes Verhältnis gegeben war. Unter der Verkehrsdichte wird dabei die Anzahl an Fahrzeugen verstanden, die innerhalb eines definierten Zeitabschnitts einen Streckenteil befahren. Unterschiedliche Verkehrsdichten in Feld und Simulator beeinflussen einzelne Kennwerte. So kann die im Fahrsimulator deutlich niedrigere mittlere Geschwindigkeit auf der Landstraße gegenüber der Feld-

fahrt u. a. mit der deutlich höheren Verkehrsdichte in simulierter Umgebung erklärt werden. Oftmals findet sich in der Literatur ein gegensätzliches Bild, sofern identische Rahmenbedingungen bei beiden Fahrten herrschen. So fahren Probanden im Fahrsimulator tendenziell schneller als im Feld (u. a. Brünger-Koch et al., 2006; Brown, 2012; Lee, 2003). Eine Beeinflussung der Blickbewegungskennwerte durch unterschiedliche Verkehrsdichten lässt sich in den Ergebnissen der Validierungsstudie jedoch nicht erkennen. Für künftige Studien kann einer auseinanderfallenden Verkehrsdichte in Feld und Simulator am besten begegnet werden, indem erst die Feldversuche durchgeführt werden. Im Anschluss daran kann anhand einer Videoanalyse aller Fahrten genau bestimmt werden, welche Verkehrsdichte jeweils herrschte und wie die Verkehrsteilnehmermodellierung in SILAB entsprechend zu erfolgen hat. Dieser Vorschlag geht jedoch mit einem enormen Modellierungsaufwand einher, da sich die Verkehrsdichten zwischen den Fahrten im Feld stark unterscheiden können und so eine individuelle Verkehrsteilnehmermodellierung für die einzelnen Probanden zu erfolgen hätte. Dieser Mehraufwand muss mit der Beeinflussung einzelner Validitätskennwerte abgewogen werden.

Auch der verwendete Fahrsimulator weist gewisse Kritikpunkte auf, die sich auf die Ergebnisse auswirken können. Zum einen verfügt der Fahrsimulator über kein Mockup; vielmehr handelt es sich um eine reine Sitzkiste. Dies erschwert die Abschätzung der simulierten Fahrzeugkarosserie für die Probanden; sie haben wenige Anhaltspunkte dafür, wie breit das Egofahrzeug ist. Insbesondere bei engen Kurven Innerorts sowie auch bei Spurwechseln auf der Autobahn können dadurch die Geschwindigkeitswahl sowie auch die Querführung beeinträchtigt sein. Zudem ist keine ausreichende physikalische Validität zwischen dem realen und simulierten Fahrzeugmodell gegeben. Dies kann die Geschwindigkeitswahl der Probanden sowie weitere Fahrdynamikkennwerte beeinflussen. Die Sichtsimulation im Fahrsimulator erfolgt, wie in vielen anderen Fahrsimulatoren, zweidimensional. Die fehlende Dreidimensionalität beeinflusst die Tiefeneinschätzung der Probanden negativ. Als Ergebnis gestaltet sich die Einschätzung des Abstands zum Vorausfahrenden schwieriger. Dies bestätigt sich in den Versuchen, bei denen der mittlere Abstand im Fahrsimulator auf der Autobahn signifikant über dem im Feld liegt. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen auch Hirata et al. (2007). Abhilfe für die drei genannten Aspekte kann die Verwendung eines Fahrsimulators mit Mockup schaffen, der über eine 3D-Sichtdarstellung verfügt und bzgl. seiner dynamischen Eigenschaften und Rückgabewerte auf das Realfahrzeug abgestimmt ist. Natürlich erhöht sich insbesondere mit den letztgenannten Erweiterungen auch das Kostenniveau eines Fahrsimulators. Da das Ziel der vorliegenden Studie jedoch u. a. darin bestand, einen einfachen, minimalen Aufbau eines Fahrsimulators zu validieren und diesen sukzessive durch wesentliche Gestaltungsparameter zu erweitern, sind diese Anpassungen bewusst nicht vorgenommen worden, um die eigentliche Zielsetzung verfolgen zu können.

Fahrerverhaltenskennwerte

Zwar zeigt die unterschiedliche Verkehrsdichte in beiden Untersuchungsumgebungen keinen Einfluss auf die Blickbewegungskennwerte, dennoch ergibt sich eine Beeinträchtigung dieser Verhaltenskennwerte durch ungleich gestaltete Versuchsbedingungen. So sind in simulierter Umgebung keine Fußgänger und Fahrradfahrer integriert. Auf diese Verkehrsteilnehmer fällt jedoch, wie die Auswertungen zeigen, insbesondere Innerorts ein gewisser Teil der Fixationen der Probanden, sodass das Fehlen dieser Objekte zunächst die Blickbewegung beeinflusst. Diese Beeinflussung wirkt sich jedoch nicht auf die zuvor dargestellten Daten aus, da Fußgänger und Radfahrer im Feld dem AOI „Sonstiges“ zugeordnet wurden; dies wird aufgrund der unterschiedlichen inbegriffenen Fixationsobjekte zwischen realer und simulierter Umgebung jedoch nicht weiter betrachtet. Sofern diese Fixationsobjekte jedoch für einen Fahrversuch von Bedeutung sind, empfiehlt sich eine an reale Verhältnisse angepasste Modellierung der simulierten Umgebung.

Als weiterer Einflussfaktor auf die Blickbewegungsdaten kann die im Fahrsimulator fehlende Projektion des hinter dem Probanden stattfindenden Verkehrsgeschehens über Rück- und Seitenspiegel genannt werden, die insbesondere bei Überholvorgängen von Bedeutung sind. Die Blickbewegung der Probanden weicht daher zwangsläufig von der im Feld ab. Der Blick wird, wie eine Ergebnisbetrachtung zeigt, stärker in die beiden äußeren Monitore gerichtet, um die fehlende Rücksicht zumindest teilweise zu kompensieren. Um dieser Abweichung zwischen Feld und Simulator vorzubeugen, sollte künftig insbesondere für innerstädtische Szenarien auf eine Simulation der Rückansicht geachtet werden. Diese kann bereits kostengünstig und einfach über Monitore in den Spiegeln oder über Projektionsleinwände in Verbindung mit realen Spiegeln realisiert werden.

Eine weitere Anmerkung ist bezüglich der Geschwindigkeitsanzeigen zu tätigen, die sich im Realfahrzeug und im Fahrsimulator voneinander unterscheiden. Während im realen Versuchsträger ein herkömmlicher, analoger Tachometer im Kombiinstrument integriert ist, behilft man sich im Fahrsimulator, aufgrund des fehlenden Armaturenbretts, mit einer digitalen Head-up-Anzeige im mittleren Simulationsmonitor. Hieraus ergeben sich zwei Beeinflussungen der Blickbewegung, die zu Differenzen zwischen beiden Untersuchungsumgebungen führen können. Zum einen ist der zurückzulegende Weg für eine Geschwindigkeitserfassung im Fahrsimulator durch die Head-up-Positionierung deutlich kürzer, sodass erwartet wird, dass die Probanden häufiger auf die Geschwindigkeitsanzeige schauen. Dies kann anhand der Ergebnisse nicht eindeutig bestätigt werden, da die erhöhte Betrachtung des Tachometers auch auf die erschwerte Geschwindigkeitseinschätzung in simulierter Umgebung zurückgeführt werden kann. Auf der anderen Seite wird die Dauer der Fixation auf einen digitalen Tacho größer ausfallen als bei einer analogen Anzeige, die gemäß DIN EN 894-2 (2009) für eine Kontrollablesung von Informationen zu bevorzugen ist. Abhilfe für beide erwartete Differenzen kann ein frei programmierbares Kombiinstrument mit analoger Geschwindigkeitsanzeige schaffen, welches in einem Fahrsimulator leicht nachgerüstet werden kann.

Physiologische Kennwerte

Die Erhebung physiologischer Signale zur Beanspruchungsmessung der Probanden, wie sie in der vorliegenden Studie angewandt wurde, gestaltet sich als fehleranfällig. So sind einige Einflussfaktoren, wie beispielsweise Umgebungsbedingungen, zu nennen, die die Ergebnisse beeinflussen können. Ein wesentlicher Aspekt ist die Temperaturabhängigkeit des Hautleitwerts. Ab einer Temperatur von 25° C und mehr ist mit deutlichen Einflüssen auf die physiologischen Messsignale zu rechnen (Faber, 1979). Zumindest im Falle der Laborversuche im Fahrsimulator wurde diese Temperaturgrenze teilweise überschritten. Im realen Versuchsträger hingegen stand den Probanden eine Klimaanlage zur Verfügung, sodass sich zwischen beiden Untersuchungsumgebungen deutliche Temperaturgefälle ergeben haben, die die Validitätsergebnisse dieser Kennwertkategorie beeinflusst haben können. Dies kann in künftigen Versuchen durch eine einheitliche klimatische Regelung ausgeschlossen werden.

Ein weiterer Einfluss auf die physiologischen Daten ergibt sich aus der Kräfterdarstellung im Fahrsimulator. Die Force-Feedback-Kräfte von Lenkrad und Pedalerie werden von einigen Probanden als zu gering eingestuft. Insbesondere in der innerstädtischen Szenerie, in der ständige Änderungen der Längs- und Querführung durch Stop-and-Go und Abbiegevorgänge vorzunehmen sind, kommt diesen Krafrückkopplungen eine entscheidende Bedeutung zu. Die mentale Beanspruchung der Probanden, gemessen anhand der Herzschlagvariabilität, liegt in der Stadt höher als im Feld, was ein Indiz für die erschwerte Längs- und Querführung im Simulator sein kann. Dies ließe sich durch entsprechend höher dimensionierte Krafrückkopplungen anpassen. Neben der Beeinflussung der physiologischen Kennwerte kann die Anpassung auch die Standardabweichung der Gaspedalposition sowie des Lenkradwinkels erheblich minimieren.

Subjektive Kennwerte

Die Tatsache des am Versuch teilgenommenen relativ jungen Probandenkollektivs kann eine Beeinflussung der subjektiven Kennwerte bewirken. So sind insbesondere junge Probanden mit PC Spielen vertraut, die eine ähnliche oder gar bessere Grafik als die Simulationssoftware aufweisen. Dies kann dazu führen, dass die Probanden die Simulatorfahrt als Spiel wahrnehmen und einstufen und sich zudem entsprechend realitätsfern verhalten.

Zudem ist ein Aspekt zu nennen, der sich ggf. negativ auf die Beschleunigungswahrnehmung der Probanden auswirken könnte. In der Simulationssoftware SILAB werden Beschleunigungskräfte visuell und auditiv dargeboten. Sofern nun eine Bewegungsplattform hinzugeschaltet wird, kann sich hieraus eine Überlagerung mit diesen dargestellten Kräften ergeben. Der resultierende Beschleunigungseindruck kann demnach überdimensioniert sein. Dies bestätigen die Aussagen einiger Probanden, sich wie in einem Flugzeug gefühlt zu haben.

Gesamtbetrachtung

Die zuvor aufgeführten einzelnen Methodikaspekte, die die ein oder andere Kennwertkategorie nachweislich oder vermutlich hinsichtlich ihrer Validitätsergebnisse beeinflussen, werden noch einmal kurz zusammengefasst und bewertet.

Es wurden einige Aspekte genannt, die zwar einen Einfluss auf bestimmte Kennwerte ausüben können, jedoch vor dem Hintergrund der eigentlichen Zielsetzung der Versuchsreihe als gerechtfertigt angesehen werden. Die Verkehrsdichte zwischen realer und simulierter Umgebung unterscheidet sich insbesondere auf Landstraße und Innerorts. Jedoch erscheint der mit einer Angleichung der Verkehrsteilnehmerzahl einhergehende Aufwand nicht gerechtfertigt. Eine Beeinflussung der Blickbewegungskennwerte lässt sich vorliegend nicht erkennen. Die Ergebnisse der Geschwindigkeitswahl der Probanden bei der Folgefahrt Landstraße sowie im innerstädtischen Bereich sind jedoch aufgrund dieser unterschiedlichen Versuchsbedingungen mit Vorsicht zu betrachten. Eine weitere Differenz in den Versuchsbedingungen stellt die Nichtmodellierung von Fußgängern und Radfahrern dar; diese wirkt sich jedoch nicht erkennbar auf die hier betrachteten Kennwerte aus.

Neben diesen Aspekten, die vor dem eigentlichen Fokus der Untersuchung als nicht kritisch eingestuft werden, gibt es dennoch einzelne Punkte, die für künftige Studien anders gestaltet werden sollten. Bei der Messung physiologischer Daten ist auf angemessene klimatische Verhältnisse zu achten. Zudem empfiehlt es sich, einen Fahrsimulator stets mit einem Mockup auszustatten, um den Probanden die Abschätzung der Fahrzeugdimensionierung zu erleichtern und die Immersion in das Fahrgeschehen und somit den subjektiv empfundenen Realitätsgrad zu erhöhen. Zudem löst sich so das Problem eines im Falle einer simplen Sitzkiste ggf. nicht vorhandenen Tachometers. Des Weiteren lässt sich so die ebenfalls angesprochene wichtige Simulation der Rückansicht im innerstädtischen Bereich leicht integrieren. Ein weiterer wesentlicher und leicht anzupassender Punkt für die Validitätsprüfung ist ein gut abgestimmtes Force-Feedback. In der vorliegenden Studie sind die Kraftrückkopplungen in Pedalerie und Lenkrad zu gering dimensioniert, sodass gleich mehrere Kennwerte beeinflusst sein können. Dies sollte in künftigen Studien durch eine gezielte Anpassung der Kräfte an das Realfahrzeug vermieden werden.

Zudem wurde an mehreren Stellen dieser Ausarbeitung die hohe Bedeutung einer physikalischen Validität eines Fahrsimulators ersichtlich. Es zeigt sich, dass die Übereinstimmung der dynamischen Charakteristika und Rückgabewerte zwischen dem Realfahrzeug und dem Fahrsimulator von essentieller Bedeutung für das Fahrerverhalten und dessen Validität ist. Somit bestätigt sich der in Kap. 2.2.1 aufgezeigte Zusammenhang zwischen physikalischer und fahrerverhaltensbezogener Validität. Demnach ist für die Erreichung absoluter Validität eine gute Abstimmung der Fahrsimulatoreinstellungen auf das Realfahrzeug notwendig, während für eine relative Validitätsbetrachtung dieser Aspekt an Gewichtung verliert.

Die größte Schwachstelle und mögliche Ergebnisbeeinträchtigung, die in direktem Zusammenhang zur physikalischen Validität steht, geht von der kleinen Bewegungsplattform aus, die Limitationen unterlegen ist. Zwar liegen keine genauen Leistungsdaten der Plattform vor, dennoch wird von einer sowohl zeitlichen als auch amplitudenbezogenen beschränkten Bewegungsinformationsbereitstellung ausgegangen. Dies führt zu einer Divergenz zwischen der über die Sichtsimulation vermittelten und der vestibulär wahrgenommenen Beschleunigung. Mögliche Folgen sind das vermehrte Auftreten von Simulatorübelkeit im dynamischen Fahrsimulator (Sammet, 2007) sowie als störend empfundene Reizdifferenzen, die sich auf die Immersion, das Fahrerverhalten und den subjektiv empfundenen Realitätsgrad einer Fahrsimulatorfahrt auswirken können. Dabei ist jedoch abschwächend anzumerken, dass getrennt voneinander dargebotene und wahrzunehmende Reize im Fahrsimulator schnell als zu stark oder störend eingestuft werden, da der Proband sich bewusst auf einzelne Aspekte der Informationswahrnehmung fokussiert. Dies ist bei einer Realfahrt nicht der Fall; hier werden keine einzelnen Reize bzgl. ihrer Intensität oder ihres Zeitpunkts hinterfragt, da sich ein stimmiges Gesamtbild über alle Reize und Sinneskanäle ergibt. Dennoch zeigt sich in diesem Versuch zweifelsfrei, dass ein nicht nah genug am Realfahrzeug ausgelegtes und arbeitendes Bewegungssystem nachteilhaft gegenüber der völligen Abstinenz von Bewegungssimulation sein kann; dies bestätigen auch Brünger-Koch (2005).

Schließlich kann auch die Wahl der zu variierenden Gestaltungsparameter sowie das Maß der getätigten Erweiterungen hinterfragt werden. Sowohl der Sichtwinkel horizontal als auch die Bewegungssimulation gelten als wesentliche Einflussgrößen auf die Validität (Zöller et al., 2013). Dies bestätigt auch die theoretische Betrachtung der Informationsaufnahme bei der Fahrzeugführung, die zeigt, dass über den visuellen und den vestibulären Sinneskanal die meisten Informationen aufgenommen werden. Jedoch gibt es hier noch weitere Gestaltungsparameter, deren Einfluss sich vielleicht als essentieller vor dem Hintergrund valider Versuchsergebnisse gezeigt hätte. So bedarf es für Überholvorgänge auf der Autobahn insbesondere Seiten- und Rückspiegel, die im Fahrsimulator nicht vorhanden sind. Sie hätten für diese Szenerie womöglich zu einer höheren Vergleichbarkeit der Daten aus Feld und Fahrsimulator geführt. Für die Stadt hingegen wird der Sichtwinkel horizontal nach wie vor als der entscheidende Parameter angesehen. Über die beiden äußeren Monitore kann nicht nur in Seitenstraßen, sondern in vielen Situationen auch die Ampel eingesehen werden. Gemäß Jamson (2001) genügt ein Sichtwinkel horizontal von 120° für eine realitätsnahe Geschwindigkeitseinschätzung. Dieses Richtmaß wird durch die im Versuch getätigte Erweiterung eingehalten bzw. übertroffen. Dennoch bleibt anzuzweifeln, ob die Geschwindigkeitseinschätzung die einzig entscheidende Größe für die Festlegung des FOV sein sollte. Die Immersion des Probanden in das Fahrgeschehen ist zweifelsohne erst bei einer Rundumsicht von 360° optimal gegeben. Bezüglich dieses Aspekts kann die im Versuch vorgenommene Erweiterung daher zu knapp bemessen worden sein. Die Hinzuschaltung einer Bewegungssimulation ist ebenfalls eine wichtige Erweiterung, die zweifelsohne wesentlich zur Fahrerverhaltensvalidität eines Fahr-

simulators beitragen kann. Jedoch ist bereits an früherer Stelle darauf hingewiesen worden, dass die Performance des hier verwendeten Hexapods zu gering ist, um die eigentlichen Vorteile einer Bewegungssimulation herauszuarbeiten. Als Fazit kann daher ergänzt werden, dass die Darstellung vestibulärer Reize nur Sinn macht, wenn die Qualität dieser Reize ein gewisses Grundniveau erreicht. Im umgekehrten Fall kann sich sonst sogar eine Verschlechterung der Ergebnisse zeigen. Zudem handelt es sich nur bei der Szenerie Stadt um einen Versuchsabschnitt, bei dem sich die Vorteile einer Bewegungsdarstellung ausreichend hätten zeigen können. Gerade bei einer konstanten Fahrt auf Landstraße oder Autobahn ist mit keinen größeren Beschleunigungs- oder Bremsvorgängen zu rechnen, die einen Unterschied zwischen statischer und dynamischer Fahrsimulatorausführung verdeutlichen würden. In der Stadt hingegen kommt es zu zahlreichen Stop-and-Go Situationen.

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, dass die ausgewählten Gestaltungsparameter durchaus ihre Berechtigung haben und ein großer Einfluss dieser auf die Validität angenommen wird. Kritisch anzusehen ist lediglich die Größe der gewählten Erweiterungen bzw. die Performance des Hexapods.

6.2 Modelldiskussion

Nach der vorgenommenen kritischen Betrachtung der Methodik der Validierungsstudie findet nun die Modelldiskussion statt.

Ziel des in Kap. 3 hergeleiteten Modells ist es, zwei grundlegende Fragen, die sich aus den aufgezeigten Forschungslücken bisheriger Validitätsergebnisse ableiten, zu beantworten:

- 1) *Sind Einflüsse ausgewählter Gestaltungsparameter auf die Fahrerhaltensvalidität zu verzeichnen?*
- 2) *Ist ein Einfluss des jeweiligen Untersuchungsszenarios auf die Fahrerhaltensvalidität zu verzeichnen?*

Die Modellbildung basiert auf der Annahme, dass beide Einflüsse vorhanden sind.

Frage 1: Einflüsse ausgewählter Gestaltungsparameter

Der Einfluss ausgewählter Gestaltungsparameter auf die Fahrerhaltensvalidität (Frage 1) wird detaillierter aufgesplittet und, zumindest für die objektiven Kennwerte, im Modell theoretisch hergeleitet. Die Wirkungsrichtung wird dabei jedoch nicht erklärt. Das Modell zeigt vielmehr für jede der Parameter-Erweiterungen auf, welche der objektiven Kennwerte beeinflusst werden; dabei basieren die Annahmen auf den Grundlagen der Wahrnehmungsphysiologie.

Es lässt sich zunächst festhalten, dass die im Modell aufgezeigten Validitätseinflüsse einzelner Gestaltungsparameter-Erweiterungen größtenteils nicht durch die Ergebnisse der empirischen Studie bestätigt werden. Von den postulierten Zusammenhängen bestätigt sich lediglich, dass sich eine Erweiterung des Sichtwinkels horizontal positiv auf die Validität der Kennwerte „relative Fixationsdauer AOI Gegenverkehr“ und „relative Fixationshäufigkeit AOI Gegenverkehr“ in der Szenerie Autobahn auswirkt. Während mit einem eingeschränkten FOV horizontal von 60° keine validen Ergebnisse für diese Kennwerte erzielt werden, führt eine Vergrößerung auf 180° zur abgezielten Validität. Alle weiteren im Modell postulierten Einflüsse fallen hingegen entweder nicht so stark aus, als dass sie die Validitätsergebnisse beeinflussen können oder aber es liegt bereits im Minimalaufbau ein Indiz für Validität vor. Dennoch lässt sich generell zeigen, dass es durchaus signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Parametersets und den damit erzielbaren Kennwtergebnissen gibt (Leithypothese LH₅, die nicht Bestandteil des Modells war) und somit die hinter dem Modell stehenden Grundüberlegungen Berechtigung haben.

Es lassen sich zwei Kritikpunkte nennen, die Erklärung dafür sein können, warum ein Großteil der theoretisch hergeleiteten Zusammenhänge nicht empirisch bestätigt wird. Zum einen kann die für die Untersuchungsreihe gewählte Methodik und dabei insbesondere die Konfiguration des Fahrsimulators und seiner Bewegungssimulation die Ergebnisse beeinflussen. Zum anderen beruht die Modellherleitung auf der Wahrnehmungsphysiologie des Menschen. Aufgrund der teilweisen Divergenzen zwischen Modellüberlegung und empirischen Ergebnissen der Untersuchungsreihe liegt der Schluss nahe, dass eine rein wahrnehmungsphysiologische Betrachtung getrennt nach einzelnen Sinneskanälen zu kurz gefasst ist, um den komplexen Zusammenhang zwischen Gestaltungsparametererweiterungen und Validitätskennwerten hinreichend zu erklären. Dies soll anhand zweier Beispiele erläutert werden:

Eine Erweiterung des Sichtwinkels horizontal im statischen Fahrsimulator von 60° auf 180° kann, allein betrachtet, zu keiner Verbesserung im Sinne der Validität führen, da die Sichtsimitation nun im Verhältnis zur Bewegungssimulation deutlich realitätsnäher ausprägt ist und der Proband dieses Ungleichgewicht wahrnimmt. Es beeinflusst seine Immersion in das Fahrgeschehen negativ. Die Differenz zwischen simulierter und realer Untersuchungsumgebung kann so durch eine Erweiterung eines Gestaltungsparameters vergrößert statt verkleinert werden.

Auf der anderen Seite muss eine gekoppelte Erweiterung der Gestaltungsparameter FOV horizontal und Bewegung nicht zwangsläufig so gut oder gar besser im Sinne der Validität sein als eine Erweiterung allein. Im Falle des betrachteten Fahrsimulators handelt es sich um ein kleines Hexapod mit entsprechenden physikalischen Limitationen der Bewegungsdarstellung. Gemäß Nilsson (1993) können physikalische Beschränkungen einer Bewegungssimulation dazu führen, dass der Proband eine Divergenz bzw. Disharmonie zwischen der erweiterten Sichtsimitation und der Bewegungssimulation wahrnimmt. Diese Widersprüchlichkeit kann

sich zum einen wiederum auf die Immersion und zum anderen auf das Auftreten von Simulatorübelkeit negativ auswirken (Hoffmann, Krüger & Buld, 2003).

In beiden aufgezeigten Fällen führt demnach ein Ungleichgewicht verschieden gut ausgeführter Gestaltungsparameter eines Fahrsimulators zu einer negativen Beeinflussung der Fahrerhaltensvalidität. Dies ist im Modell bislang unberücksichtigt gelassen.

Frage 2: Einfluss des Untersuchungsszenarios

Eine ebenfalls mit dem Modell zu beantwortenden Frage (Frage 2) bezieht sich auf den Einfluss des Untersuchungsszenarios auf die Fahrerhaltensvalidität. Die Ergebnisse der empirischen Studie bestätigen diesen Einfluss, wie beispielsweise anhand des Kennwerts der mittleren Geschwindigkeit gezeigt werden kann. Während bei einer Freien Fahrt auf der Autobahn alle vier Fahrten im Fahrsimulator, verglichen mit der Realfahrt, ein Indiz für absolute Validität des Kennwerts erkennen lassen, zeigt sich für die innerstädtischen Szenarien sowie die Freie Fahrt auf der Landstraße ein konträres Bild. Jedes der betrachteten Parametersets im Fahrsimulator führt zu einem signifikant unterschiedlichen Ergebnis für die mittlere Geschwindigkeit gegenüber der Realfahrt. Auch das Blickverhalten der Probanden unterscheidet sich zwischen den Szenarien. Dies bestätigt bereits Roesler (2010), der darauf hinweist, dass es einen Zusammenhang zwischen der Komplexität einer Szene und dem Blickverhalten gibt. Komplexität beschreibt dabei die Anzahl an unbekanntem, neuen Informationen, die ein Fahrer in einem vordefinierten Zeitintervall aufnehmen muss (Elvik, 2004). In komplexen, innerstädtischen Szenarien erfolgt die Informationsaufnahme überwiegend foveal, während in weniger komplexen Szenarien viele Informationen peripher wahrgenommen werden (Eckert, 1993). Es zeigt sich demnach für 20 der 27 betrachteten Kennwerte ein Einfluss des Szenarios auf die Fahrerhaltensvalidität. Jedoch ergibt sich nicht für jeden analysierten Kennwert ein gleichgerichtetes Ergebnis, sodass es einer fallweisen Betrachtung bedarf, um die Frage des Einflusses des Untersuchungsszenarios zu beantworten. Diesen Detaillierungsgrad weist das Modell nicht auf.

Gesamtbetrachtung

Als Schlussfolgerung aus dem Abgleich der empirischen Ergebnisse mit den theoretisch hergeleiteten Annahmen des Modells lässt sich festhalten, dass Fahrsimulatorvalidität durchaus von einigen Einflussgrößen wie dem Untersuchungsszenario und den Gestaltungsparametern abhängig ist. Lediglich für vereinzelte Kennwerte, wie beispielsweise die Herzschlagvariabilität und den Hautleitwert auf der Autobahn, zeigt sich kein Einfluss der Gestaltungsparameter auf die Validitätsergebnisse; hier kann den Ergebnissen zufolge für jede Fahrsimulorkonfiguration absolute Validität indiziert werden. Auch lässt sich die Stärke und Richtung dieser Einflüsse auf theoretischem Wege kaum herleiten, handelt es sich bei der

Fahrerverhaltensvalidität doch um ein äußerst komplexes Konstrukt. So führt ein realitätsnäher ausgestatteter Fahrsimulator nicht zwingend zu besseren Validitätsergebnissen. Eine Gestaltungsparameter-Ausweitung kann vielmehr auch zu einer neutralen oder gar negativen Beeinflussung einzelner Kennwerte und ihrer Übertragbarkeit auf reale Umgebungen führen. Diese Tatsache verdeutlicht noch einmal die Komplexität und die Abhängigkeiten einzelner dargebotener Reize untereinander. Der aufeinander abgestimmten Qualität und Harmonie verschiedener Reizkanäle und –signale scheint eine große Bedeutung zuzukommen.

Vor dieser Erkenntnis gewinnen die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Validierungsstudie noch einmal an Bedeutung. Sie liefern unmittelbare Hinweise darauf, welches der hier untersuchten Parametersets für welchen Kennwert in Abhängigkeit des Szenarios ggf. zu validen Ergebnissen führt.

7 Fazit und Ausblick

Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit liefern wesentliche Hinweise zur Übertragbarkeit der in simulierter Untersuchungsumgebung erhobenen Daten auf reales Fahrerverhalten.

Zunächst lässt sich festhalten, dass durchaus Unterschiede zwischen Feld und Fahrsimulator feststellbar sind. So erweisen sich einzelne Validitätskennwerte als signifikant unterschiedlich zwischen realer und simulierter Umgebung; sie lassen sich nicht valide in einem Fahrsimulator erheben. Je nach Untersuchungsfrage und Kennwertbetrachtung eignet sich ein Fahrsimulator demnach nicht als Alternative zum Feldversuch. Diese Erkenntnis ist gerade vor dem Hintergrund des zunehmenden Rückgriffs auf simulierte Untersuchungsumgebungen wichtig und bei der künftigen Planung von Fahrversuchen zu berücksichtigen.

Auch zeigt die vorgestellte Untersuchungsreihe auf, dass unterschiedliche Parametersets und somit Fahrsimulatorkonfigurationen zu unterschiedlichen Validitätsergebnissen führen. Es ist ein Einfluss der betrachteten Gestaltungsparameter Bewegungssimulation und Sichtwinkel horizontal auf die Fahrerverhaltensvalidität zu verzeichnen. Dabei wirken sich die Gestaltungsparameter in Abhängigkeit verschiedener Kennwerte unterschiedlich stark sowie auch in unterschiedliche Richtung aus. Pauschalaussagen für verschiedene Gestaltungsparameter im Hinblick auf ihre Validitätsauswirkungen lassen sich demnach nicht treffen. Festzuhalten bleibt jedoch, dass sich nicht jeder Fahrsimulator bzw. jede Fahrsimulatorkonfiguration zur Erforschung aller Fragestellungen eignet.

Eine wesentliche Erkenntnis in diesem Bereich ist zudem, dass eine Gestaltungsparametererweiterung nicht zwangsläufig zu gleichwertigen oder gar besseren Ergebnissen im Sinne der Validität führt. Vielmehr wird in einigen Fällen eine geringere Übereinstimmung zwischen Feld und Fahrsimulator erzielt, nachdem ein Gestaltungsparameter gezielt ausgeweitet wurde. Vor allem der Einklang und die Harmonie zwischen den dargebotenen Reizen in einem Fahrsimulator scheinen entscheidend für die Fahrerverhaltensvalidität und die Immersion des Probanden in das Verkehrsgeschehen zu sein.

Neben dem Einfluss der Gestaltungsparameter erweist sich auch der vermutete Einfluss verschiedener Untersuchungsszenarien auf die Validitätsergebnisse als gerechtfertigt. Je nach Szenario, welches für eine Untersuchungsreihe gewählt wird, sind einzelne Kennwerte mit bestimmten Parametersets valide abbildbar, während andere Kennwerte oder auch andere Parametersets zu keiner Validität führen. Pauschalaussagen zum Einfluss des Szenarios auf die Validität sind demnach ebenso nicht möglich, da sich dieser Faktor in Abhängigkeit des betrachteten Kennwerts und Parametersets unterschiedlich auswirkt. Herauszustellen bleibt jedoch, dass sich nicht jeder Kennwert in einem Untersuchungsszenario valide in einem Fahrsimulator abbilden lässt.

Gerade vor dem Hintergrund der nicht zu treffenden Pauschalaussagen zum Einfluss von Gestaltungsparametern und Szenario auf einzelne Kennwerte liefert die vorliegende Arbeit mit

ihrer Untersuchungsreihe wesentliche Validitätsergebnisse, die für künftige Konzeptionen von Fahr Simulatorversuchen herangezogen werden können. Durch die sukzessive Erweiterung der Gestaltungsparameter und die Untersuchung des Einflusses dieser auf Kennwerte aller vier Kennwertkategorien unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien werden umfangreiche Validitätserkenntnisse geliefert. Es zeigt sich, dass bereits kleine Schritte in der Gestaltungsparametervariation, wie sie hier vorgenommen wurden, zur Beeinflussung der Validitätsaussagen führen. Die gelieferten Ergebnisse helfen bei der Konzeption künftiger Studien insoweit, als dass in Abhängigkeit des jeweils zu untersuchenden Kennwerts und des relevanten Szenarios eine Aussage darüber getroffen werden kann, welches der Parametersets valide Ergebnisse liefert und entsprechend herangezogen werden sollte. Dabei ist stets die bereits angesprochene Erkenntnis zu berücksichtigen, dass eine Gestaltungsparameter-Erweiterung nicht zwangsläufig zu einer Verbesserung der Fahrerhaltensvalidität führt und somit die Detailaussagen der hier vorgestellten Untersuchungsreihe durchaus von Belang sind.

Die detaillierten Validitätsergebnisse dieser Arbeit können als erster Schritt hin zu einem Leitfaden für eine valide Fahrsimulation gesehen werden. Die Untersuchungsreihe unterliegt gewissen Rahmenbedingungen, die es in künftigen Studien auszuweiten und anders auszurichten gilt, um weitere Erkenntnisse zur Fahrerhaltensvalidität zu sammeln. So wurde auf Basis eines low-level Fahr Simulators eine gezielt klein gewählte Erweiterung von Gestaltungsparametern vorgenommen. Ggf. kann sich also bei einem Vergleich von Fahr Simulatoren, die sich hinsichtlich einzelner Gestaltungsparameter stärker unterscheiden, durchaus zeigen, dass der Fahr Simulator mit höherer Darstellungsgüte übergreifend bessere Validitätsergebnisse liefert. Zudem beschränkt sich die Variation auf die zwei ausgewählten Gestaltungsparameter Bewegungssimulation und Sichtwinkel horizontal. Entsprechend kann bei der Analyse des Einflusses anderer Gestaltungsparameter ggf. eine Pauschalaussage zur Richtung des Einflusses getroffen werden. Zweifelsfrei liefern weitere Studien, die sich andere Gestaltungsparameter oder andere Untersuchungsszenarien ansehen, weitere wesentliche Erkenntnisse für eine valide Fahrsimulation. Bei der Durchführung weiterer Studien kann die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Untersuchungsmethodik als Beispiel für eine im Hinblick auf die Ergebnisqualität und Aussagekraft gute Validitätsanalyse dienen.

Literaturverzeichnis

- Abendroth, B. & Bruder, R. (2009). Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für eine aktive Sicherheit und Komfort* (S. 1-14). Wiesbaden: Vieweg.
- Abendroth, B., Bruder, R., Fuchs, K. & Schramm, T. (2009). Beurteilung von Systemen im Fahrzeug – Welche Messmethoden sind geeignet? *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 63 (3), 223-231.
- Abendroth, B., Schreiber, M., Bruder, R., Maul, S. & Maul, D. (2011). Übertragbarkeit des Längsführungsverhaltens von Simulatorstudien auf Realfahrten - Was macht der Fahrer im Simulator anders als im Feld? In GfA (Hrsg.), *Mensch, Technik, Organisation – Vernetzung im Produktentstehungs- und herstellungsprozess*, 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, 23.-25. März 2011, Chemnitz, 157-160.
- Abendroth, B., Schreiber, M., Bruder, R., Maul, S. & Maul, D. (2012). Neue Ansätze zur Beurteilung der Fahrsimulatorvalidität. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 66 (1), 2–11.
- Adolph, T. (2008). *Ermittlung und Bewertung der Beanspruchung zweier unterschiedlicher Fahrerkollektive durch messtechnische Erfassung psychophysiologischer Leistungs- und Befindlichkeitsparameter an der Schnittstelle Fahrer-Fahrzeug-Umwelt als Beitrag zur Verkehrssicherheit*. Dissertation, Medizinische Fakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- Ahlström, C., Bolling, A., Sörensen, G., Eriksson, O. & Andersson, A. (2012). *Validating speed and road surface realism in VTI driving simulator III*. VTI rapport, 745 A.
- 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 (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (Kap. 2). Boca Raton [u.a.]: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Alm, H. (1995). Driving simulator as research tools: a validation study based on the VTI Driving Simulator. In *GEM validation studies: appendix, Drive II Project V2065*. Linköping: VTI.
- American Psychological Association (APA) (2008). *Standards for Educational and Psychological Testing* (5. Aufl.). Washington DC: American Psychological Association.
- 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 (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (Kap. 8). Boca Raton [u.a.]: CRC Press Taylor & Francis Group.
- 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 roads. *Accident Analysis & Prevention*, 40 (3), 1078-1087.
- Bengler, K., Bernasch, J. H. & Löwenau, J. P. (1996). Comparison of eye movement behaviour during negotiation of curves on test track and in BMW Driving Simulator. In *Annual Meeting of the Europe Chapter of the Human Factors and Ergonomics Society*, 7.-8. November, Groningen.

- Bengler, K., Praxenthaler, M., Theofanou, D. & Eckstein, L. (2004). Investigation of visual demand in different driving simulators within the ADAM project. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC Paris*, 8.-10. September 2004, 91-104.
- Benson, A. J. (1988). Aetiological factors in simulator sickness. In Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD) (Hrsg.), *Motion cues in flight simulation and simulator induced sickness* (Conference Proceedings 433). Neuilly sur Seine: NATO, Author.
- Bernasch, J. H., Bengler, K., Löwenau, J. P. & Scholles, M. (o.J.). Comparison of Viewing Strategies during Curve Negotiation in Reality and in Simulation. [unveröffentlicht]
- Bertin, R. J. V., Collet, C. & Graf, W. (2005). Objective Measurement of Simulator Sickness and the Role of Visual-Vestibular Conflict Situations. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC Orlando*, 30. November-2. Dezember 2005.
- Beusmans, J. M. (1998). Optic flow and the metric of the visual ground plane. *Vision Research*, 38, 1153–1170.
- Biedermann, B. (1984). *Straßentrassierung auf der Grundlage von Geschwindigkeiten aus Sehfelduntersuchungen*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt.
- Birbaumer, N. & Schmidt, R. F. (2006). *Biologische Psychologie* (6. Aufl.). Heidelberg: Springer.
- Blaauw, G. J. (1982). Driving Experience and Task Demands in Simulator and Instrumented Car: A Validation Study. *Human Factors*, 24 (4), 473-486.
- Blana, E. (1996a). *Driving simulator validation studies: A literature review*. Institute for Transport Studies, University of Leeds, Working Paper 480.
- Blana, E. (1996b). *A survey of driving research simulators around the world*. Institute for Transport Studies, University of Leeds, Working Paper 481.
- Blana, E. (1999). Behavioural Validation of a Fixed-base Driving Simulator. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC Paris*, 7.-8. Juli 1999.
- Blana, E. & Golias, J. (2002). Differences between vehicle lateral displacement on the road and in a fixed-base simulator. *Human Factors*, 44 (2), 303-313.
- Böckelmann, I. & Sammito, S. (2013). Messung psychischer Belastung mit der Herzratenvariabilität – ein Ausblick. In *9. Bundesweiter Betriebsärztetag*, 23.-24. Februar 2013, Osnabrück.
- Boer, E. R., Girshick, A. R., Yamamura, T. & Kuge, N. (2000). Experiencing the Same Road Twice: A Driver Centered Comparison between Simulation and Reality. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC Paris*, 6.-8. September 2000, 33-55.
- Böhlke, J. (1984). *Blendung des Kraftfahrers durch direktes Licht der tiefstehenden Sonne*. Dissertation, RWTH Aachen. Aachen.
- Bortz, J. (2005). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (6. Aufl.). Berlin: Springer.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler* (4. Aufl.). Berlin: Springer.

- Boucsein, W. (1988). *Elektrodermale Aktivität. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Berlin: Springer-Verlag.
- Boucsein, W. (2012). *Electrodermal Activity* (2. Aufl.). New York: Plenum Press.
- Boucsein, W. & Backs, R. W. (2000). *Engineering psychophysiology: Issues and applications*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bremmer, F. & Lappe, M. (1999). The use of optical velocities for distance discrimination and reproduction during visually simulated self-motion. *Experimental Brain Research*, 127 (1), 33-42.
- Breuer, J. (1996). Ergonomische Beurteilung und Gestaltung der Sicherheit des Arbeitssystems Kraftfahrzeugführen. *Fortschritt-Berichte VDI*, 12 (271). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Breuer, J., Rohmert, W., Breuer B. J. & Bielaczek C. (1996). *Human determinants of active safety: results of interdisciplinary driver behaviour experiments*. Paper Number 96-S2-O-01.
- Brown, J. L. (1975): Visual elements in flight simulator. *Report of Working Group 34*. Washington DC: National Research Council.
- Bruder, R., Abendroth, B. & Landau, K. (2007). Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung. In R. Bruder & H. Winner (Hrsg.), *Wie objektiv sind Fahrversuche? Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug* (S. 79-93). Stuttgart: Ergonomia.
- Bruder, R. & Didier, M. (2012). Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 314-324). Wiesbaden: Vieweg Teubner.
- Brünger-Koch, M. (2005). Motion parameter tuning and evaluation for the DLR automotive simulator. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC Orlando*, 30. November-2. Dezember 2005.
- Brünger-Koch, M., Briest, S. & Vollrath, M. (2006). Do you feel the difference? A motion assessment study. In *Proceedings of the Asia-Pacific Driving Simulation Conference DSC Tsukuba*, 31. Mai-2 Juni 2006.
- Bruns, T. & Praun, N. (2002). *Biofeedback: Ein Handbuch für die therapeutische Praxis*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Bubb, H. (2003). Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen? In K. Landau & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 557, (S. 26-39). Düsseldorf: VDI.
- Caird, J. K. & Horrey, W. J. (2011). Twelve practical and useful questions about driving simulation. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (Kap. 5). Boca Raton [u.a.]: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Carter, C. J. & Laya, O. (1998). Drivers' visual search in a field study and in a driving simulator. In A. G. Gale (Hrsg.), *Vision in Vehicles VI* (S. 21-31). Amsterdam: Elsevier.
- Chanton, O., Sauvage, J., Kassaagi, M. & Coratte, J.-F. (2002). Study of car loss of control: A comparison between an experiment on the dynamic simulator of Renault and a test track study. In *Proceedings of Driving Simulator Conference DSC Paris*, 11.-13. September, 213-227.

- Chatziastros, A. (2003). *Visuelle Kontrolle der Lokomotion*. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen. Gießen.
- Chatziastros, A., Wallis, G. M. & Bühlhoff, H. H. (1999). The use of splay angle and optical flow in steering a central path. In A. G. Gale (Hrsg.), *Vision in Vehicles VIII*. Amsterdam: Elsevier.
- Chrysler, S. T., Cooper, J., McGehee, D.V. & Yager, C. (2013). Comparison of driver distraction evaluations across two simulator platforms and an instrumented vehicle. In *Proceedings of the 7th international driving symposium on human factors in driver assessment, training, and vehicle design*, 544-550.
- Classen, S., Shechtman, O., Stephens, B., Davis, E., Bendixen, R., Belchior, P., ... Mann, W. (2007). The Impact of Roadway Intersection Design on Driving Performance of Young and Senior Adults. *Traffic Injury Prevention*, 8 (1), 69-77.
- Cohen, A. S. (1984). Einflussgrößen auf das nutzbare Sehfeld: Bericht zum Forschungsprojekt 8005. In BAST (Hrsg.), *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- Cohen, A. S. (1994). Visuelle Informationsaufnahme des motorisierten Verkehrsteilnehmers. In *Informationsaufnahme des Verkehrsteilnehmers*, 3. Fachtagung Verkehrssicherheit (S. 17-34). Wien: Interdisziplinäre Unfallforschung.
- Cohen, A. S. (1998). *Visuelle Orientierung im Straßenverkehr*. Bern: Bfu.
- Colombet, F., Dagdelen, M., Reymond, G., Pere, C., Merienne, F. & Kemeny, A. (2008). Motion Cueing: What is the impact on the Driver's behavior? In *Proceedings of the Driving Simulator Conference DSC Monaco*, 31. Januar -1. Februar 2008, 171-181.
- Cooper, G. E. & Harper, R. P. (1969). *The use of pilot ratings in the evaluation of aircraft handling qualities* (NASA Ames Technical Report NASA TN-D-5153). Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center.
- 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 (Hrsg.), *Handbook of perception and cognition, Vol. 5: Perception of space and motion* (S. 69-117). San Diego (CA): Academic Press.
- De Valck, E., Quanten, S., Cluydts, R. & Berckmanns, D. (2006). Day versus night driving in real traffic and on a driving simulator during an 800km all-highway drive. *International Journal of Vehicle Design*, 42 (1/2), 199-133.
- De Winter, J. C. F., De Groot, S., Mulder, M., Wieringa, P. A. & Dankelman, J. (2008). The search for higher fidelity in fixed-base driving simulation: Six feedback systems evaluated. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC Monaco*, 31. Januar -1. Februar 2008, 183-192.
- Devos, H., Nieuwboer, A., Vandenberghe, W., Tant, M., De Weerd, W. & Uc, E. (2013). Validation of driving simulation to assess on-road performance in huntington disease. In *Proceedings of the 7th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 241-247.

- Duller, C. (2013). *Einführung in die Statistik mit EXCEL und SPSS. Ein anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch* (3. Aufl.). Berlin: Springer.
- Duncan, B. (1995). Calibration trials of TRL driving simulator. In A. G. Gale (Hrsg.), *Vision in Vehicles VI* (S. 105-113). Amsterdam: Elsevier.
- Eckert, M. (1993). *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr* (1. Aufl.). Berlin [u.a.]: Verlag Technik GmbH.
- Elvik, R. (2004). To what extent can theory account for the findings of road safety evaluation studies? *Accident Analysis and Prevention*, 36 (5), 841-849.
- Engen, T. (2008). *Use and validation of driving simulators*. Dissertation, Norwegian University of Science and Technology. Trondheim.
- Engström, J., Johansson, E. & Ostlund, J. (2005). Effects of Visual and Cognitive Load in Real and Simulated Motorway Driving. *Transportation Research Part F*, 8 (2), 97-120.
- Eysel, U. (2007). Sehen und Augenbewegung. In R. F. Schmidt & F. Lang (Hrsg.), *Physiologie des Menschen: Mit Pathophysiologie* (30. Aufl., S. 345-385). Berlin [u.a.]: Springer Medizin Verlag Heidelberg.
- Faber, S. (1979). *Hautleitfähigkeitsuntersuchungen als Methode in der Arbeitswissenschaft*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.
- Fastenmeier, W. (Band-Hrsg.) (1995). *Autofahrer und Verkehrssituation. Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme*. Köln: Verlag TÜV Rheinland.
- Fastenmeier, W. (1998). Fahrerunterstützung durch ACC. In 7. *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik von VKA, ika, RWTH, VDI* (S. 567-582). Aachen: RWTH.
- Fecher, N. (2005). *Analyse des stationären Folgeverhaltens von PKW-Fahrzeugführern unter Berücksichtigung von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.
- Field, A. (2009). *Discovering statistics using SPSS* (3. Aufl.). London: SAGE.
- Filzek, B. (2002). *Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.
- Fischer, M. (2009). *Motion-Cueing-Algorithmen für eine realitätsnahe Bewegungssimulation*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Braunschweig.
- Fortmüller, T. (2003). Der Einfluss visueller und vestibulärer Informationen auf die Qualität des Fahrindrucks in der Fahrsimulation. In Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Anforderungen, Anwendungen, Aspekte für Mensch-Maschine-Systeme*, 2. - 3. Juni 2003 Braunschweig, Bd. 1768, 313-329. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Frank, L. H., Casali, J. G. & Wierwille, W. W. (1988). Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator. *Human Factors*, 30 (2), 201-217.

- Frings, S. & Müller, F. (2014). *Biologie der Sinne. Vom Molekül zur Wahrnehmung*. Berlin [u.a.]: Springer Spektrum.
- Fröscher, F. (2011). *Erfassung und individuelle Auswertung psychophysiologischer Parameter bei der Emotionsverarbeitung*. Dissertation, Universität Ulm. Ulm.
- Fu, R., Guo, Y., Chen, Y., Yuan, W., Ma, Y., Peng, J., ... Wang, C. (2011). Research on heart rate and eye movement as indicators of drivers' mental workload. In *3rd International Conference on Road Safety and simulation*, 14.-16. September 2011, Indianapolis USA.
- Geyer, S., Baltzer, M., Franz, B., Hakuli, S., Kauer, M., Kienle, M., ... Winner, H. (2013). Concept and Development of a Unified Ontology for Generating Test and Use Case Catalogues for Assisted and Automated Vehicle Guidance. *IET Intelligent Transport Systems*, 8 (3), 183-189.
- Giakoumis, D., Tzovaras, D. & Hassapis, G. (2013). Subject-dependent biosignal features for increased accuracy in psychological stress detection. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71 (4), 425-439.
- Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin.
- Godley, S. T., Triggs, T. J. & Fildes, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident analysis and prevention*. 34 (5), 589-600.
- Goldstein, E. B. (2008). *Wahrnehmungspsychologie. Der Grundkurs (7. Aufl.)*. Heidelberg: Spektrum.
- Grant, P. (1995). *The Development of Tuning Paradigm for Flight Simulator Motion Drive Algorithms*. Dissertation, University of Toronto. Toronto.
- Green, P. (2005). How driving simulator data quality can be improved. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC Orlando*, 30. November-2. Dezember 2005.
- Greenberg, J. & Blommer, M. (2011). Physical fidelity of driving simulators. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (Kap. 7). Boca Raton [u.a.]: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Greenberg, J., Curry, R., Blommer, H., Kozak, K., Artz, B., Cathey, L. & Kao, B. (2006). The validity of Last-Second braking and steering Judgements in advanced Driving Simulators. In *Proceedings of the Driving Simulator Conference DSC Paris*, 4.-6. Oktober 2006, 143-156.
- Grüsser, O.-J. & Grüsser-Cornehls, U. (1987). Gesichtssinn. In R. F. Schmidt & G. Thews (Hrsg.), *Physiologie des Menschen* (23. Aufl., S. 240-290). Berlin: Springer-Verlag.
- Guzek, M., Jurecki, R., Lozia, Z. & Stanczyk, T. L. (2006). Comparative analyses of driver behaviour on the track and in virtual environment. In *Proceedings of Driving Simulator Conference DSC Paris*, 4.-6. Oktober 2006, 221-232.
- Hancock, P. A. & Sheridan, T. B. (2011). The future of driving simulation. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (Kap. 4). Boca Raton [u.a.]: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Harms, L. (1996). Driving Performance on a real and in a driving simulator: results of a validation study. In A. G. Gale, I. D. Brown, C. M. Haslegrave & S. Taylor (Hrsg.). *Vision in Vehicles V* (S. 19-26). Amsterdam: Elsevier.

- Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Hrsg.): *Advances in Psychology: Human mental workload*, 52, 139-183.
- Hartman, E. (1970). Driver vision requirements. In *1970 International Automobile Safety Conference Compendium*, SAE Technical Paper 700392 (S. 629-630). New York: SAE Inc.
- Haug, E. J. (1990). *Feasibility study and conceptual design of a national advanced driving simulator*. Iowa City: University of Iowa.
- Herget, J. (1982). Über Informationsdarstellung an Bord. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 28 (1), 3-10.
- Hering, K. (1999). *Situationsabhängiges Verfahren zur standardisierten Messung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr. Literaturübersicht im Straßenverkehr*. Aachen: Shaker Verlag.
- Hirata, T., Yai, T. & Takagawa, T. (2007). Development of the Driving Simulation System MOVIC-T4 and Its Validation Using Field Driving Data. *Tsinghua Science & Technology*, 12 (2), 141-150.
- Hoffmann, S. & Buld, S. (2006). Darstellung und Evaluation eines Trainings zum Fahren in der Fahrsimulation. Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* (S. 113-132). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Hoffmann, S., Krüger, H.-P. & Buld, S. (2003). Vermeidung von Simulator Sickness anhand eines Trainings zur Gewöhnung an die Fahrsimulation. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), *Simulation und Simulatoren. Mobilität virtuell gestalten* (S. 385-404). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Hoskins, A. H. & El-Gindy, M. (2006). Technical Report: Literature Survey on Driving Simulator Validation Studies. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 13 (2), 241-252.
- Hussy, W. & Jain, A. (2002). *Experimentelle Hypothesenprüfung in der Psychologie*. Göttingen: Hogrefe.
- Jamson, H. & Mouta, S. (2004). More bang for your buck? A cross-cost simulator evaluation study. In *Proceedings of the Driving Simulator Conference DSC Paris*, 8.-10. September 2004, 321-332.
- Jamson, H. & Smith, P. (2002). How real does it feel? An "emotional" validation of the Leeds Driving Simulator. In *Proceedings of Driving Simulator Conference DSC Paris*, 11.-13. September 2002, 271-278.
- Jamson, H. (2000). Driving Simulation validity: issues of field of view and resolution. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC Paris*, 6.-8. September 2000, 57-64.
- Jamson, H. (2001). Image characteristics and their effect on driving simulator validity. In *Proceedings of the International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, Colorado, 190-195.
- Jamson, H. (2011). Crossplattform validation issues. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (Kap. 12). Boca Raton [u.a.]: CRC Press Taylor & Francis Group.

- Jamson, S. L. & Jamson, A. H. (2010). The validity of a low-cost simulator for the assessment of the effects of in-vehicle information systems. *Safety Science*, 48 (10), 1477-1483.
- Johnson, M. J., Chahal, T., Stinchcombe, A., Mullen, N., Weaver, B. & Bédard, M. (2011). Physiological responses to simulated and on-road driving. *International Journal of Psychophysiology*, 81 (3), 203–208.
- Jorna, P. G. (1993). Heart-Rate and Workload Variations in Actual and Simulated Flight. *Ergonomics*, 36 (9), 1043-1054.
- Kappé, B., Van Erp, J. & Korteling, J. E. (1999). Effects of Head-Slaved and Peripheral Displays on Lane-Keeping Performance and Spatial Orientation. *Human Factors*, 41 (3), 453-466.
- Kapstein, N., Van der Horst, A. & Hoekstra, W. (1996). *The effect of field of view and scene content on the validity of a driving simulator for behavioural research*. TNO-report TM-96-A022. Soesterberg: TNO-TM.
- Kayser, H. J., Sanders, A. F., Heß, M., Spijkers, W. A. C. & Bartmann, A. (1989). Das Wahrnehmungsverhalten des Kraftfahrers in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit und der Straßenraumgestaltung. In Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*. Forschungsbericht (Heft 557). Bonn: Götzky-Drucke GmbH.
- Kellogg, R. S. & Gillingharn, K. K. (1986). United States Air Force experience with simulator sickness, research and training. In *Proceedings of the Human Factors Society 30th Annual Meeting* (S. 427-429). Santa Monica, CA: Human Factors Society.
- Kemeny, A. & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7 (1), 31-37.
- Klebelsberg, D. (1982). *Verkehrspsychologie*. Berlin [u.a.]: Springer.
- 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.
- Knappe, G. (2009). *Empirische Untersuchungen zur Querregelung in Fahrsimulatoren. Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen und Sensitivität von Messgrößen*. Dissertation, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen-Nürnberg.
- Kornhuber, H. H. (1978). Blickmotorik. In O. H. Gauer, K. Kramer, R. Jung (Hrsg.), *Physiologie des Menschen*, Band 13: Sehen (Sinnesphysiologie III), S. 357-426. München [u.a.]: Urban & Schwarzenbeck.
- Kraft, C. (2010). Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. Dissertation. In *Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik 5*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Krause, M., Yilmaz, L. & Bengler, K. (2014). Comparison of Real and Simulated Driving for a Static Driving Simulator. In *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE Krakow*, 19-23 July 2014, 2868-2879.
- Küting, H. (1976). *Belastung und Beanspruchung des Kraftfahrers – Literaturübersicht*. Köln: Bundesanstalt für Straßenwesen.

- Land, M. & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature*, 377, 339–340.
- Lange, C. (2008). *Wirkung von Fahrerassistenz auf die Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*. Dissertation, Technische Universität München. München.
- Larish, J. F. & Flach, J. M. (1990). Sources of optical information useful for perception of speed of rectilinear self-motion. *Journal of Experimental Psychology: Perception and Performance*, 16 (2), 295-302.
- Leclerc, F., Petit, C., Mollard, R. & Collet, C. (2008). Braking strategies and mental load under simulated and actual driving conditions. In *Proceedings of the Driving Simulator Conference DSC Monaco*, 31. Januar -1. Februar 2008, 205-212.
- Lee, D. N. (1980). The optic flow field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 290 (1038), 169–179.
- Lee, H. C. (2003). The validity of driving simulator to measure on-road driving performance of older drivers. *Transport Engineering in Australia*, 8 (2), 89-100.
- Lienert, G. A. & Raatz, U. (1998). *Testaufbau und Testanalyse* (6. Aufl.). Weinheim: Beltz, PVU.
- Liu A. & Chang S. (1995). Forced Feedback in a stationary driving simulator. In *Systems, Man and Cybernetics, Intelligent Systems for the 21st Century, IEEE International Conference Vol. 2*, 22.-25. Oktober 1995, Vancouver, 1711-1716.
- Löllgen, H. (1999). Neue Methoden in der kardialen Funktionsdiagnostik. Herzfrequenzvariabilität. *Deutsches Ärzteblatt*, 96 (31-32), 45–48.
- Loomis, J. M. & Knapp, J. M. (1999). Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. In L. J. Hettinger & M. W. Haas (Hrsg.), *Virtual and Adaptive Environments* (S. 21-46). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Luczak, H. (1975). *Untersuchungen informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.
- Luczak, H. & Laurig, W. (1973). An Analysis of Heart Rate Variability. *Ergonomics*, 16 (1), 85-97.
- Lykken, D. T. & Venables, P. H. (1971). Direct Measurement of skin conductance: a proposal for standardization. *Psychophysiology*, 8 (5), 656-672.
- Marberger, C. (2008). Absolute and Perceived Validity of the Fraunhofer IAO immersive Driving Simulator. In *Proceedings of the Driving Simulator Conference DSC Monaco*, 31. Januar -1. Februar 2008, 195-204.
- Matthews, G., Desmond, P. & Joyner, S. (1995). *Validation of the Driver Stress Inventory and the Driver Coping Questionnaire*. Dundee, Scotland, UK: University of Dundee.
- Mayhew, D. R., Simpson, H. M., Wood, K. M., Lonero, L., Clinton, K. M. & Johnson, A.G. (2011). On-road and simulated driving: concurrent and discriminant validation. *Journal of Safety Research*, 42 (4), 267–275.
- McAvoy, D. S., Schattier, K. L. & Datta, T. K. (2007). Driving simulator validation for nighttime construction work zone devices. *Transportation Research Record*, 2015, 55-63.

- McCormick, E. J. (1970). *Human Factors Engineering* (3. Aufl.). New York: McGraw-Hill.
- McLane, R. C. & Wierwille, W. W. (1975). The influence of motion and audio cues on driver performance in an automobile simulator. *Human Factors*, 17 (5), 488-501.
- McLaughlin, S., Hankey, J. & Dingus, T. (2009). Driver Measurement: Methods and Applications. In D. Harris (Hrsg.), *Engin. Psychol. and Cog. Ergonomics* (S. 404-413). Berlin [u.a.]: Springer.
- McLean, J. R. & Hoffman, E. R. (1975). Steering reversals as a measure of driver performance and steering task difficulty. *Human Factors*, 17 (3), 248 -256.
- McNair, D. M., Lorr, M. & Droppelman, L. F. (1971). *EDITS Manual for the Profile of Mood States*. San Diego: Educational and Industrial Testing Service.
- Megaw, T. (2005). The definition and measurement of mental workload. In J. Wilson & E. Corlett (Hrsg.), *Evaluation of human work* (3. Aufl., S. 525-551). London: Taylor & Francis.
- Mehler, B., Reimer, B., Coughlin, J. F. & Dusek, J. A. (2009). Impact of incremental increases in cognitive workload on physiological arousal and performance in young adult drivers. *Transportation Research Record*, 2138, 6-12.
- Miram, W. (1978). *Informationsverarbeitung - Reiz-, Sinnes-, Neurophysiologie, Kybernetik*. Hannover: Schrödel Fachbuchverlag GmbH.
- Mittelstaedt, H. (1983). A new solution to the problem of the subjective vertical. *Naturwissenschaft*, 70 (6), 272-281.
- Molino, J., Katz, B., Duke D., Opieln, K., Andersen, C. & Moyer, M. (2005). Validate First; Simulate Later: A New Approach Used at the FHWA Highway Driving Simulator. In *Proceedings of the Driving Simulator Conference DSC Orlando*, 30. November -2. Dezember 2005.
- Mourant, R. & Sadhu, P. (2002). Evaluation of force feedback steering in a fixed-based driving simulator. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 46th Annual Meeting*, 2202-2205.
- Mudd, S. (1968). Assessment of the fidelity of dynamic driving simulators. *Human Factors*, 10 (4), 351-358.
- Mulder, G. & Mulder, L. J. M. (1981). Information Processing and Cardiovascular Control. *Psychophysiology*, 18 (4), 392-401.
- 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 (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (Kap. 13). Boca Raton [u.a.]: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Nakayama, K. & Loomis, J. M. (1974). Optical velocity patterns, velocity-sensitive neurons, and space perception: A hypothesis. *Perception*, 3, 63-80.
- Negele, H. J. (2007). *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahr simulatoren für die Fahrzeugentwicklung*. Dissertation, Technische Universität München. Denklingen.

- Neimer, J. & Mohellebi, H. (2009). Differential Approach to assess the validity of a motion-base driving simulator. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6 (7).
- Nilsson, L. (1993). Behavioural research in an advanced driving simulator- Experiences of the VTI system. In *Proceedings of the 37th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 612-616.
- Östlund, J., Nilsson, L., Törnros, J. & Forsman, Å. (2006). *Effects of cognitive and visual load in real and simulated driving*. VTI Report 533A.
- Östlund, J., Peters, B., Thorslund, B., Engström, J., Markkula, G., Keinath, A., ... Foehl, U. (2005). *Driving performance assessment methods and metrics*. Projektbericht: AIDE IST-1-507674-IP.
- Owens, D. A. & Tyrrell, R. A. (1999). Effects of luminance, blur and age on nighttime visual guidance: a test of the selective degradation hypothesis. *Journal of Experimental Psychology*, 5 (2), 115-128.
- Padmos, P. & Milders, M. V. (1992). Quality criteria for simulator images: A literature review. *Human factors*, 34 (6), 727-748.
- Panerai, F., Favre, B., Balligand, E., Kemeny, A., Kelada, J.-M. & Droulez, J. (2001). Speed and safety distance control in truck driving: comparison of simulation and real-world environment. In *Proceedings of the Driving Simulator Conference DSC Sophia Antipolis*, 5.-7. September 2001, 91-107.
- Philipp, P. A. (1990). *Forschungsinstrument Fahrsimulator* (unter Mitarbeit von Daimler-Benz-AG). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Pinto, M., Cavallo, V. & Ohlmann, T. (2008). The development of driving simulators: toward a multi-sensory solution. *Le travail humain*, 71 (1), 62-95.
- Reed, M. P. & Green, P. A. (1995). *Validation of a low-cost driving simulator using a telephone dialing task*. Orlando: Link Foundation.
- Reid, G. B. & Nygren, T. E. (1988). The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Hrsg.), *Human mental workload* (S. 185–218). Amsterdam: Elsevier.
- Reif, K. & Dietsche, K.-H. (2007). *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Reimer, B., D'Ambrosio, L. A., Coughlin, J. B., Kafrissen, M. E. & Blederman, J. (2006). Using Self-Reported Data to Assess the Validity of Driving Simulation Data. *Behavioural Research Methods*, 38 (2), 314-324.
- Reimer, B. & Mehler, B. (2011). The impact of cognitive workload on physiological arousal in young adult drivers: a field study and simulation validation. *Ergonomics*, 54 (10), 932–942.
- Repa, B. S., Leucht, P. M. & Wierwille, W. W. (1981). The Influence of Motion Cues on Driver-Vehicle Performance in a Simulator. In *Proceedings of the 17th Annual Conference on Manual Control*, Ort, 157-169.
- Retz-Schmidt, G. (1992). *Die Interpretation des Verhaltens mehrerer Akteure in Szenenfolgen*. Berlin: Springer Verlag.

- Reymond, G., Berthoz, A., Droulez, J. & Kemeny, A. (2001). Role of lateral acceleration in curve driving: driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. *Human Factors*, 43 (3), 483–495.
- Roesler, D. (2010). *Fahrrelevanz von Elementen des Straßenverkehrs – Beschreibung, Erfassung und Anwendung*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz. Chemnitz.
- Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 1984 (4), 193-200.
- Rohmert, W. (1994). *Arbeitswissenschaftliche Methodensammlung* (Begleitmaterial zur Vorlesung Arbeitswissenschaft). Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Rohmert, W., Laurig, W. & Jenik, P. (1974). *Ergonomie und Arbeitsgestaltung – dargestellt am Beispiel des Bahnpostbegleitdienst*. Berlin [u.a.]: Beuth-Vertrieb.
- Rolfe, J. M. & Staples, K. J. (1986). *Flight simulation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Roscoe, A. H. (1987). *The practical assessment of pilot workload* (AGARD-AG-282). Neuilly Sur Seine: Advisory Group for Aerospace Research and Development.
- Rose, A., Oehme, A., Kolrep, H. & Jürgensohn, T. (2005). Unterschiede bei physiologischen Indikatoren des Fahrerzustandes zwischen Realfahrt und Simulator. In L. Urbas & C. Steffens (Hrsg.), *Zustandserkennung und Systemgestaltung. 6. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*, 13.-15. Oktober 2005. Fortschritt-Berichte VDI, 22 (22), 161-165.
- Rudin-Brown, C. M., Williamson, A. & Lenné, M. G. (2009). *Can driving simulation be used to predict changes in real world crashes risk?* (No. 299). Monash University Accident Research Centre.
- Sammet, T. (2007). Motion-Cueing-Algorithmen für die Fahrsimulation. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 12, Band 643, Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Santos, J., Merat, N., Mouta, S., Brookshuis, K. & De Waard, D. (2005). The interaction between driving and in-vehicle information system: Comparison of results from laboratory, simulator and real-world studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8 (2), 135-146.
- Schandry, R. (2011). *Biologische Psychologie* (3. Aufl.). Weinheim [u.a.]: Beltz Verlag.
- Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H. (2010). *Arbeitswissenschaft* (3. Aufl.). Berlin [u.a.]: Springer.
- Schmidt, D. & Winner, H. (2007). Kombination von Fahrdynamiksensor- und Globalen Navigations-satellitensystemdaten zur Performanceverbesserung von Fahrerassistenzsystemen. Positionierung und Navigation. In *Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON) – Symposium „Positionierung und Navigation“*, 06.-07. November 2007, Magdeburg.
- Schmidtke, H. (1993). *Ergonomie* (3. Aufl.). München [u.a.]: Carl Hanser Verlag.
- Schneider, J. H. (2009). *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz. Chemnitz.
- Schönplflug, W. & Schönplflug, U. (1997). *Psychologie* (4. Aufl.). München [u.a.]: Urban & Schwarzenberg.

- Schwarz, C. W. (2011). Validating Vehicle Models. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (Kap. 11). Boca Raton [u.a.]: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Schweigert, M. (2003). *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*. Dissertation, Technischen Universität München. München.
- Senserrick, T. M., Brown, T., Quistberg, D. A., Marshall, D. & Winston, F. K. (2007). Validation of Simulated Assessment on Teen Driver Speed Management on Rural Roads. In *Annual Proceedings Association Advancement of Automotive Medicine*, 51, 525-536.
- Shechtman, O., Classen, S., Awadzi, K. & Mann, W. (2009). Comparison of Driving Errors Between On-the-Road and Simulated Driving Assessment: A Validation Study. *Traffic Injury Prevention*, 10 (4), 379-385.
- Shechtman, O., Classen, S., Stephens, B., Davis, E., Bendixen, R., Belchior, P., ... Mann, W. (2007). The Impact of Intersection Design on Simulated Driving Performance of Young and Senior Adults. *Traffic Injury Prevention*, 8 (1), 78-86.
- Shinar, D. & Ronen, A. (2007). Validation of speed perception and production in a single screen simulator. *Advances Transportation Studies*, Special Issue, 51-56.
- Singhal, S. K. & Cheriton, D. R. (1995). Exploiting position history for efficient remote rendering in networked virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 4 (2), 169-193.
- Slater, M. & Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6 (6), 603-616.
- Spatz, A. (2008). *Zur Messung im Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Umfeld. Eine empirische Studie zur Anzahl der Antwortkategorien bei einer Ratingskala*. Dissertation, Universität Augsburg. Augsburg.
- Stanton, N. A., Young, M. S., Walker, G. H., Turner, H. & Randle, S. (2001). Automating the driver's control tasks. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5 (3), 221-236.
- Statler, I. C. (1981). Characteristics of flight simulator visual systems. In Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD) (Hrsg.), *Advisory Report 164*. Neuilly sur Seine: NATO.
- Straus, S. H. (2005). *New, Improved, Comprehensive, and Automated Driver's License Test and Vision Screening System* (No. FHWA-AZ-04-559). Phoenix: Arizona Department of Transportation.
- Takeuchi, T. & De Valois, K. K. (2000). Velocity discrimination in scotopic vision. *Vision Research*, 40 (15), 2011-2024.
- Tomasits, J. & Haber, P. (2011). Wie reagiert der Körper auf Belastungen? In J. Tomasits & P. Haber (Hrsg.), *Leistungsphysiologie. Grundlagen für Trainer, Physiotherapeuten und Masseur* (4. Aufl., S. 57-84). Wien [u.a.]: Springer.
- Tomaske, W. (1983). *Einfluß der Bewegungsinformation auf das Lenkregelverhalten des Fahrers sowie Folgerungen für die Auslegung von Fahr simulatoren*. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg. Hamburg.

- Tomaske W. & Meywerk M. (2006). Möglichkeiten zur Vermittlung von subjektiven Fahreindrücken mit Fahrsimulatoren. In K. Becker (Hrsg.), *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen III. Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und –komponenten* (Band 56, S. 1-16). Renningen: Expert Verlag.
- Törnös, J. (1998). Driving Behaviour in a Real and in Simulated Road Tunnel – A Validation Study. *Accident Analysis and Prevention*, 30 (4), 497-503.
- 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.
- Wang, Y., Mehler, B., Reimer, B., Lammers, V., D'Ambrosio, L. & Coughlin, J. (2010). The validity of driving simulation for assessing differences between in-vehicle informational interfaces: A comparison with field testing. *Ergonomics*, 53 (3), 404–420.
- Watts, G. R. & Quimby, A. R. (1979). *Design and validation of a driving simulator for use in perceptual studies* (Report No. 907). Berkshire, UK: Transport and Road Research Laboratory.
- Weir, D. H. & Clarke, A. J. (1995). *A survey of mid-level driving simulators* (SAE Tech. Paper 95012). Warrendale, PA: Society of Automobile Engineers.
- Wickens, C. D. & Hollands, J. G. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance* (3. Aufl.). New Jersey: Prentice-Hall.
- Wolf, H. J. (2009). *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen*. Dissertation, Technischen Universität München. München.
- Woyna, L. (2014). *Fahrerzentrierter Kriterienkatalog zur Außensichtbeurteilung im PKW*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.
- Yan, X., Abdel-Aty, M., Radwan, E., Wang, X. & Chilakapati, P. (2008). Validating a driving simulator using surrogate safety measures. *Accident Analysis & Prevention*, 40 (1), 274-288.
- Zenner, H. P. (2006). Gleichgewicht. In R. F. Schmidt (Hrsg.), *Neuro- und Sinnesphysiologie* (5. Aufl., S. 312-327). Heidelberg: Springer.
- Zöllner, I., Betz, A., Mautes, N., Scholz, L., Abendroth, B., Bruder, R. & Winner, H. (2015a). Valid representation of a highly dynamic collision avoidance scenario in a driving simulator. *Transportation Research Part F*, 31, 54-66.
- Zöllner, I., Diederich, C., Abendroth, B. & Bruder, R. (2013). Fahrsimulatorvalidität - Systematisierung und quantitative Analyse bisheriger Forschungen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 68 (4), 197-206.
- Zöllner, I., Mautes, N., Ren, W. & Abendroth, B. (2015b). SimuVal - eine Wissenssammlung für valide Fahrsimulation. *ATZ*, 117 (3), 70-73.
- Zöllner, I., Yang, N., Abendroth, B. & Bruder, R. (2014). Zur Validität des Blickbewegungsverhaltens unter Nachtsichtverhältnissen in einer Fahrsimulatorstudie. In *60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*, 12-14. März 2014, München, 599-601.

Normen:

DIN EN ISO 10075 – 1 (2000). *Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1: Allgemeines und Begriffe*. Berlin: Beuth.

DIN EN 894 – 2 (2009). *Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 2: Anzeigen*. Berlin: Beuth.

Internetquellen:

Braithwaite, J., Watson, D. G., Jones, R. & Rowe, M. (2013). *A Guide for Analysing Electrodermal Activity (EDA) & Skin Conductance Responses (SCRs) for Psychological Experiments*. Abgerufen von <http://www.birmingham.ac.uk/documents/college-les/psych/saal/guide-electrodermal-activity.pdf> [17.12.2014].

Brown, L. S. (2012). *A Validation of the Oregon State University Driving Simulator*. Masterthesis, Oregon State University. Abgerufen von <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/10193431.pdf> [17.12.2014].

Chialakapati, P. K. (2006). *Driving Simulator validation and rear-end crash risk analysis at a signalized intersection*. Masterthesis, University of Florida. Abgerufen von http://etd.fcla.edu/CF/CFE0001391/Chialakapati_Praveen_K_200612_MA.pdf [17.12.2014].

European society of cardiology (1996). Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *European Heart Journal*, 17, 354-381. Abgerufen von http://www.escardio.org/guidelines-surveys/esc-guidelines/Scientific_Statements/Documents/guidelines-Heart-Rate-Variability-FT-1996.pdf [04.12.2014].

Mantsch, S. (o.J.). *Psychophysiologische Stressreaktionen während des Musizierens*. Bakkalaureatsarbeit, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien. Abgerufen von http://www.mdw.ac.at/mbm/a3/mugewiki/lib/exe/fetch.php?media=class_idx_dir:bakk.arbeitstephanmantsch-musik_stress.pdf [17.12.2014].

Mathur, D. R., Bham, G. H., Vallai, M. & Leu, M. C. (2010). Validation of driving simulator for study of driver behavior in work zones. In D. R. Mathur (Hrsg.), *Validation of driving simulator and driver perception of vehicle mounted attenuator markings in work zones*. Masterthesis, Missouri University of Science and Technology. Abgerufen von https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/27379/Mathur_2010.pdf?sequence=1 [17.12.2014].

Miller, S. (2001): *Literature review – workload measures*. Document N01-006, University of Iowa. Abgerufen von <http://www.nads-sc.uiowa.edu/publicationStorage/200501251347060.N01-006.pdf> [17.12.2014].

NEUROCOR (2014). *Autonome Funktionsdiagnostik: Fitness-Stress-Gesundheit*. Abgerufen von http://www.neurocor.de/grundlagen_hrv%282%29_de.html [04.12.2014].

Pfister, E. A., Rüdiger, H. & Scheuch, K. (2001). *Herzrhythmusanalyse in der Arbeitsmedizin*. Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM). Abgerufen von http://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/002-021_S1_Herzrhythmusanalyse_in_der_Arbeitsmedizin_08-2005_08-2010.pdf [04.12.2014].

Rolland, J. & Hua, H. (2005). *Head-mounted display systems*. Encyclopedia of Optical Engineering, 2005. Abgerufen von http://www.academia.edu/8194068/EOE_HMDsystem_Rolland_Hua_05 [17.12.2014].

Slater, M., Linakis, V., Usoh, M. & Kooper, R. (1996). *Immersion, Presence, and Performance in Virtual Environments: An Experiment with Tri-Dimensional Chess*. Abgerufen von <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.34.6594&rep=rep1&type=pdf> [17.12.2014].

Weiß, C. (2006). *Control of a Dynamic Driving Simulator: Time-Variant Motion Cueing Algorithms and Prepositioning*. Diplomarbeit. Universität Stuttgart. Abgerufen von <http://elib.dlr.de/46949/1/MotionCueingAlgorithms.pdf> [17.12.2014].

Studentische Arbeiten:

Fiebig, C. (2014). *Durchführung von Fahrversuchen im Feld und Auswertung der fahrdynamischen und physiologischen Daten im Rahmen einer Validitätsstudie*. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]

Gaar, E. (2014). *Aufbereitung, Auswertung und Interpretation physiologischer Daten aus Feld- und Simulatorversuchen*. Studienarbeit, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]

Grimm, S. (2013). *Entwicklung und Evaluierung eines Versuchskonzepts für eine Feld- und Simulatorstudie zur Analyse der Fahrerhaltensvalidität eines Fahrtrainers*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]

Grosch, J. (2013). *Durchführung von Fahrversuchen am IGD Fahrtrainer zur Analyse von Blickbewegungsdaten und subjektiven Empfindungen*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]

Halbig, F. (2014). *Vergleichende Analyse und Interpretation physiologischer Daten aus Feld- und Simulatorversuchen*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]

Hansen, C. (2014). *Durchführung von Fahrversuchen im Feld und Auswertung der Blickbewegungsdaten im Rahmen einer Validitätsstudie*. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]

Jesionek, A. (2013). *Entwicklung eines Auswertungskonzepts für fahrdynamische und physiologische Daten und Durchführung von Fahrversuchen zur Evaluation des Konzepts*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]

Käsmann, S. (2013). *Durchführung von Fahrversuchen am IGD Fahrtrainer zur Analyse von Blickbewegungsdaten und subjektiven Empfindungen*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]

Logarajah, S. (2013). *Physiologische Beanspruchungsindikatoren – Aussagekraft, Erhebungs- und Auswertungsmethoden*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]

- Luh, M. F. (2013). *Durchführung von Fahrversuchen am IGD Fahrsimulator zur Analyse fahrdynamischer und physiologischer (Validitäts-)Kennwerte*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]
- Pagojus, B. (2012). *Durchführung einer Metaanalyse zur Beurteilung der Validität von Fahrsimulatoren*. Studienarbeit, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]
- Qiu, S. (2013). *Analyse des Praxiseinsatzes und Systematisierung von Fahrsimulatoren und deren Gestaltungsparametern*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]
- Schork, S. (2013). *Entwicklung und Implementierung von Fahrsimulatorszenarien für ein bereits vorhandenes Versuchskonzept*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]
- Seebold, L. A. (2013). *Erweiterung eines bestehenden Versuchskonzepts für Feld- und Simulatorversuche – Schwerpunkt: Zeitsynchronisierung von Messsystemen*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]
- Stauder, D. (2014). *Informationswahrnehmung bei der Fahrzeugführung in realer und simulierter Umgebung*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]
- Wegner, N. (2013). *Entwicklung eines Auswertungskonzepts für Blickbewegungs- und subjektive Daten und Durchführung von Fahrversuchen zur Evaluation des Konzepts*. Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. [unveröffentlicht]

Anhang

Gestaltungsparameter Fahrsimulator – eine Übersicht

Parameter	Erläuterung
<i>Visuelle Wahrnehmung</i>	
Bildgebendes Medium	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Ausprägung:</i> Projektion, Display, HMD (Head-Mounted-Display)¹⁰ - <i>Wechselwirkung:</i> Rückprojektionen generieren eine höhere Helligkeit und einen besseren Kontrast als Frontprojektionen (Padmos & Milders, 1992); pro Kanal ist nur ein begrenzter Sichtwinkel bei zugleich großer räumlicher Auflösung erzielbar (Padmos & Milders, 1992)
Verzögerungszeit (Latenz; engl. delay)	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Grundlagen:</i> Menschen sind in der Lage eine Latenz von 100 ms zu erkennen (Singhal & Cheriton, 1995) - <i>Anforderung:</i> Der minimal akzeptable Verzug hängt von der Reaktionsgeschwindigkeit ab, die eine Fahrsituation verlangt (Padmos & Milder, 1992); eine Latenz von maximal 150 ms gilt für Fahrsimulatoren als akzeptabel (Frank, Casali & Wierwille, 1988; Padmos & Milders, 1992) - <i>Wechselwirkung:</i> Die maximale Latenz bestimmt die minimale Update Frequenz (Padmos & Milders, 1992)
Dimensionalität	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Ausprägung:</i> 2D oder 3D (stereoskopisches Display) - <i>Grundlagen:</i> Eine stereoskopische Sicht kann die Abstandseinschätzung erleichtern (Pinto et al., 2008) und als Ergänzung zum optischen Fluss die Wahrnehmung der Eigenbewegung verstärken (Palmisano, 1996, zitiert nach Pinto et al., 2008) - <i>Anforderung:</i> Weit verbreitet ist eine zweidimensionale Sichtdarstellung in Simulatoren, dennoch ist eine 3D-Darstellung aufgrund der genannten Vorteile zu bevorzugen
Sichtwinkel horizontal	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Anforderung:</i> Gemäß Haug (1990) ist ein Winkel von 50° horizontal als minimaler Sichtwinkel akzeptabel; für eine korrekte Geschwindigkeitswahrnehmung sind mindestens 120° notwendig (Jamson, 2001), während jedoch mindestens 180° empfohlen werden, wenn die periphere Informationswahrnehmung wichtig ist, wie beim Spurwechsel oder Rechtsabbiegen (Padmos & Milders, 1992) - <i>Wechselwirkung:</i> Es existieren negative Wechselwirkung mit der räumlichen Auflösung (Kappé, Van Erp & Korteling, 1999; Jamson, 2000); zudem erhöht ein größerer Sichtwinkel die Wahrscheinlichkeit eines Konflikts mit vestibulären Reizen (Pino et al., 2008) sowie die Wahrschein-

¹⁰ Unter Head-Mounted-Displays (HMD) werden Displaybrillen verstanden, die dem Probanden Bildinformationen direkt vor seinem Auge bereitstellen. Head Tracking-Module sorgen dabei für die Synchronisierung der Kopfbewegungen des Probanden mit der visuellen Darstellung (Rolland & Hua, 2005).

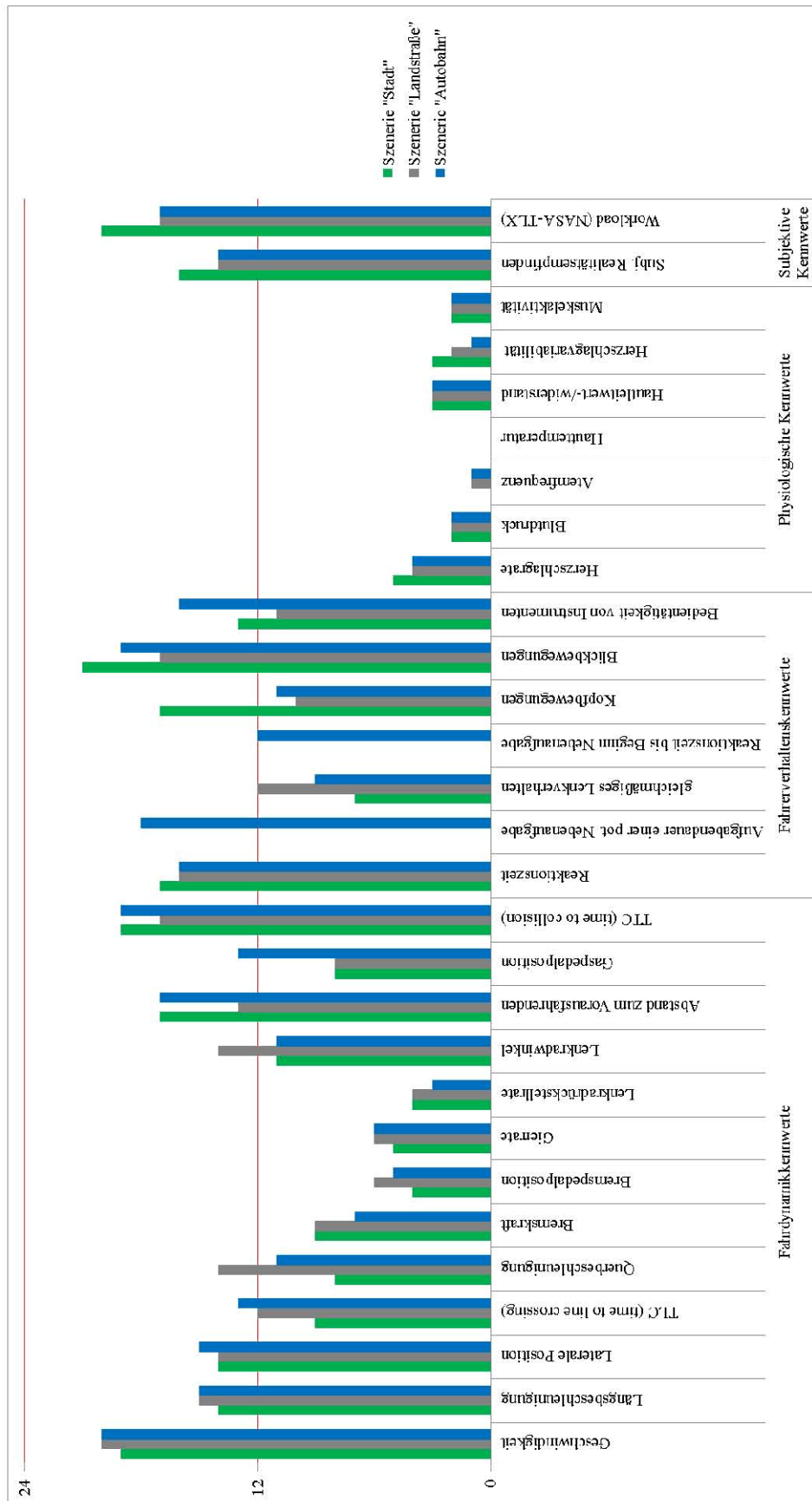
Parameter	Erläuterung
	lichkeit für das Auftreten der Simulatorübelkeit (Benson, 1988; Kellogg & Gillingham, 1986)
Sichtwinkel vertikal	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Grundlagen:</i> Der vertikale Sichtwinkel in einem realen Fahrzeug ist oftmals geringer als im Fahrsimulator (Van der Horst et al., 1990, zitiert nach Kapstein et al., 1996) - <i>Anforderung:</i> Padmos & Milders (1992) halten einen Sichtwinkel von 40° vertikal für ausreichend
Räumliche Auflösung	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Grundlagen:</i> Die räumliche Auflösung beschreibt die Anzahl der Bildpunkte in Breite und Höhe; sie gibt an, wie gut ein System kleine Details sichtbar machen kann (Padmos & Milders, 1992); die räumliche Auflösung beeinflusst die Entdeckung von entfernten Objekten (Andersen, 2011), die Bewegungswahrnehmung aufgrund eines eingeschränkt dargestellten optischen Flusses (Andersen, 2011), die Müdigkeit und Überanstrengung (Greenberg & Bloomer, 2011) und die Immersion in die Simulation (Andersen, 2011) - <i>Anforderung:</i> Gängig ist eine Auflösung von 1024 x 780 Pixel (Andersen, 2011), während eine Auflösung äquivalent zur menschlichen Sehschärfe (Auflösung von 60 Pixel/° bei einer durchschnittlichen menschlichen Sehschärfe von 1 arcmin⁻¹) ideal wäre (Pinto et al., 2008); eine räumliche Auflösung von 15 Zeilen/Grad gilt jedoch bereits für viele Anwendungen als ausreichend (Padmos & Milders, 1992)
Zeitliche Auflösung	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Grundlagen:</i> Die Update-Frequenz (auch Frame-Rate; Frequenz, mit der der Bildinhalt völlig neu generiert wird) ist zu unterscheiden von der Refresh-Rate (Frequenz, mit der ein identisches Frame an das Visualisierungsdisplay gesendet wird) (Statler, 1981; Rolfe & Staples, 1986) - <i>Grundlagen:</i> Eine zu geringe Update-Rate verursacht wackelige Bilder oder verzerrte Konturen und beeinflusst so den optischen Fluss und die Geschwindigkeitswahrnehmung (Andersen, 2011) sowie auch die Gefahr für Simulatorkrankheit (Greenberg & Bloomer, 2011); eine zu geringe Refresh-Rate erzeugt Helligkeitsflickern (Padmos & Milders, 1992) - <i>Anforderung:</i> Bei einem FOV größer 70° und einer Helligkeit von mindestens 100 cd/m² sollte die Refresh-Rate bei mindestens 80-90 Hz liegen, während bei einer Luminanz von 20 cd/m² eine Refresh-Rate von 50-60 Hz genügt (Padmos & Milders, 1992); gängige Werte für die Update-Frequenz liegen bei 30 Bildern pro Sekunde (Andersen, 2011; Padmos & Milders, 1992)

Parameter	Erläuterung
	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Wechselwirkung</i>: Probanden nehmen ein Helligkeitsflackern bei größerer Helligkeit und weiterem Sichtwinkel stärker wahr (Padmos & Milders, 1992)
Luminanz	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Grundlagen</i>: Das menschliche Sichtsystem arbeitet in einem Helligkeitsbereich von 10^{-6} bis 10^8 cd/m² (Padmos & Milders, 1992); eine zu geringe Luminanz kann zu einer Unterschätzung der Geschwindigkeit führen (Takeuchi & De Valois, 2000); zudem beeinflusst die Helligkeit die Wahrnehmung von Farbe, Kontrast und Details (Padmos & Milders, 1992) - <i>Anforderung</i>: Die Sehschärfe und Präzision beim Steuern nimmt ab einer Leuchtdichte von 0,003 cd/m² ab (Owens & Tyrrell, 1999); optimalen Leuchtdichte-Bedingungen im Fahrsimulator liegen meist im Bereich von ca. 50 cd/m² (Andersen, 2011) - <i>Wechselwirkung</i>: Die Anfälligkeit für Flickern steigt mit zunehmender Helligkeit und beeinflusst so die Bildwiederholrate (Padmos & Milders, 1992); eine höhere Helligkeit bedarf somit einer höheren zeitlichen Auflösung
Kontrast	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Grundlagen</i>: Der Kontrast beschreibt das Verhältnis von maximaler zu minimaler Helligkeit des Displays (Padmos & Milders, 1992); er beeinflusst die Geschwindigkeitswahrnehmung, sie kann bei zu geringem Kontrast unterschätzt werden (Blakemore & Snowden, 1999, zitiert nach Kemeny & Panerai, 2003) - <i>Anforderung</i>: Eine Kontraste von 10:1 bzw. 25:1 gilt als ausreichend für einen Großteil der Anwendungen (Padmos & Milders, 1992) - <i>Wechselwirkung</i>: Abhängig von der Luminanz
Farbpalette	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Grundlagen</i>: CGIs können meist bis zu 256³ Farbreize abbilden (Padmos & Milders, 1992) - <i>Anforderung</i>: Generell hängt die Anzahl notwendiger Helligkeitsschritte von den darzustellenden Szenen ab (Padmos & Milders, 1992); 300 Farbwerte sind ca. nötig, um komplexere, texturierte Szenen auf jedem Helligkeitsniveau realistisch abzubilden (Padmos & Milders, 1992); 30 Helligkeitsniveaus sind ausreichend für einfache Aufgaben (Padmos & Milders, 1992)
Fahrzeugkabine	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Ausprägung</i>: Bandbreite von Desktop-Aufbauten bis zu realen Fahrzeugkarosserien - <i>Grundlagen</i>: Beeinflusst die Immersion des Probanden

Parameter	Erläuterung
<i>Vestibuläre Wahrnehmung</i>	
Bewegungssystem	- <i>Ausprägung:</i> Hexapod (Steward Plattform), Schienensysteme, Vibrationsplattformen/ -aktoren, Drehteller
Skalierung von Geschwindigkeit und Beschleunigung	- <i>Grundlagen:</i> Meist durch einen Skalierungsfaktor reduziert, da eine 100% Darstellung nicht möglich ist und die menschlichen Wahrnehmungsschwellen genutzt werden können; der maximal nutzbare Skalierungsfaktor (maximum useful scale factor, MUSF) gibt die physikalischen Grenzen eines Fahrsimulators, getrennt für die einzelnen Freiheitsgrade, an (Greenberg & Blommer, 2011); ein zu stark beschränktes Bewegungssystem ermöglicht ein zu geringes Spektrum an Skalierungsfaktoren und somit eine schlechtere Reproduzierbarkeit an Fahrmanövern (Greenberg & Bloomer, 2011); die Probanden haben eine geringere Fahrzeugkontrolle, zudem erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für Simulatorkrankheit - <i>Anforderung:</i> Für laterale Bewegungen sei gemäß Greenberg & Bloomer (2011) ein Wert von 0,5 bis 1,0 und für longitudinale Bewegungen eine Größenordnung kleiner 0,05 als Skalierungsmaß möglich
Auslenkungsreichweite	- <i>Grundlagen:</i> Der Gierwinkel eines Hexapod-Systems ist in den meisten Fällen auf ca. 20° beschränkt (Kraft, 2010) - <i>Anforderung:</i> Ein Neigungswinkel von 25° genügt zur Darstellung realistischer Beschleunigungsreize (Pinto et al., 2008; Kraft, 2010)
Freiheitsgrade	- <i>Ausprägung:</i> Hexapod (drei Freiheitsgrade), Schienensystem (ein bis zwei Freiheitsgrade), Drehscheibe (ein Freiheitsgrad), Vibrationsaktoren (je ein Freiheitsgrad)
Frequenzbandbreite	- <i>Grundlagen:</i> Signale außerhalb der Bandbreite werden nicht übertragen; eine zu geringe Bandbreite führt zu einer fehlerbehafteten Fahrdynamiksimulation, die ihrerseits die Immersion des Fahrers beeinträchtigt (Greenberg & Bloomer, 2011)
<i>Auditive Wahrnehmung</i>	
Soundsystem	- <i>Ausprägung:</i> Kopfhörer, Soundsystem; Einkanal- (mono), Zweikanal- (stereo) und Mehrkanaldarstellung (surround) - <i>Grundlagen:</i> Eine akustische Informationsdarbietung wirkt sich positiv auf die Immersion des Fahrers aus

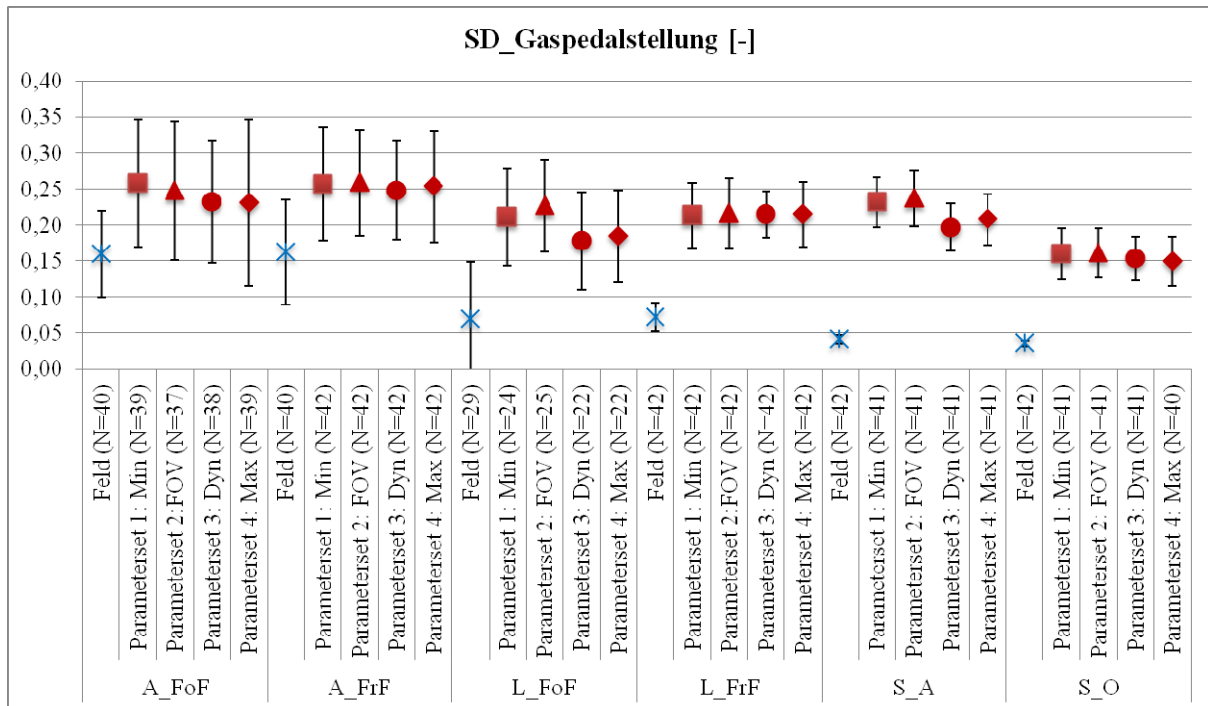
Parameter	Erläuterung
<i>Haptische Wahrnehmung</i>	
Feedbacksysteme	<ul style="list-style-type: none">- <i>Ausprägung:</i> Feedbacksysteme (Lenkrad, Pedalerie), Gurtstraffer, Vibrationssitz- <i>Grundlagen:</i> Darstellung von Vibration, Kraft oder Druck (De Winter et al., 2008)- <i>Grundlagen:</i> Die Stärke der Widerstände im Lenkrad und Pedalerie haben Auswirkungen auf die Fahrzeugkontrolle (Greenberg & Bloomer, 2011); zu hohe Pedalwiderstände erhöhen zudem die Wahrscheinlichkeit für Simulatorkrankheit (Greenberg & Bloomer, 2011)

Ergebnisse Expertenbefragung



Ergebnisse weiterer Fahrdynamikkennwerte

Standardabweichung Gaspedalstellung:



Die Gaspedalstellung wird für jeweils beide Szenarien (Freie Fahrt und Folgefahrt) auf Autobahn und Landstraße ausgewertet. Übergreifend liegt dabei die Standardabweichung im Feld deutlich unter den Werten im Fahrsimulator; die deskriptiven Werte sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

	A_FoF		A_FrF		L_FoF		L_FrF	
Feld	$\bar{x} = 0,16$	$\sigma = 0,06$	$\bar{x} = 0,16$	$\sigma = 0,07$	$\bar{x} = 0,07$	$\sigma = 0,08$	$\bar{x} = 0,07$	$\sigma = 0,02$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 0,26$	$\sigma = 0,09$	$\bar{x} = 0,26$	$\sigma = 0,08$	$\bar{x} = 0,21$	$\sigma = 0,07$	$\bar{x} = 0,21$	$\sigma = 0,04$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 0,25$	$\sigma = 0,10$	$\bar{x} = 0,26$	$\sigma = 0,10$	$\bar{x} = 0,23$	$\sigma = 0,06$	$\bar{x} = 0,22$	$\sigma = 0,05$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 0,23$	$\sigma = 0,08$	$\bar{x} = 0,25$	$\sigma = 0,08$	$\bar{x} = 0,18$	$\sigma = 0,07$	$\bar{x} = 0,21$	$\sigma = 0,03$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 0,23$	$\sigma = 0,12$	$\bar{x} = 0,25$	$\sigma = 0,12$	$\bar{x} = 0,18$	$\sigma = 0,06$	$\bar{x} = 0,21$	$\sigma = 0,05$

Bei der *Folgefahrt* auf der *Autobahn* sind die Unterschiede der Standardabweichung Gaspedalstellung zwischen den Parametersets und den Feldergebnissen durchgehend signifikant (LH₁: $t(36) = -5,548$; $p = 0,000$; LH₂: $t = -3,538$; $p = 0,000$; LH₃: $t(35) = -3,935$; $p = 0,000$; LH₄: $t(36) = -3,474$; $p = 0,001$). Im Rahmen der Auswertung von Leithypothese 5 zeigt sich kein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors.

Für die *Freie Fahrt* auf der *Autobahn* ergibt sich ebenfalls eine Differenz zwischen Feld und den Fahrsimulatorfahrten. Analog zur Folgefahrt erweist sich auch hier der Unterschied zwischen beiden Untersuchungsumgebungen als signifikant (LH₁: $t(39) = -6,577$; $p = 0,000$; LH₂: $t(39) = -7,627$; $p = 0,000$; LH₃: $t(39) = -6,730$; $p = 0,000$; LH₄: $t(39) = -6,960$;

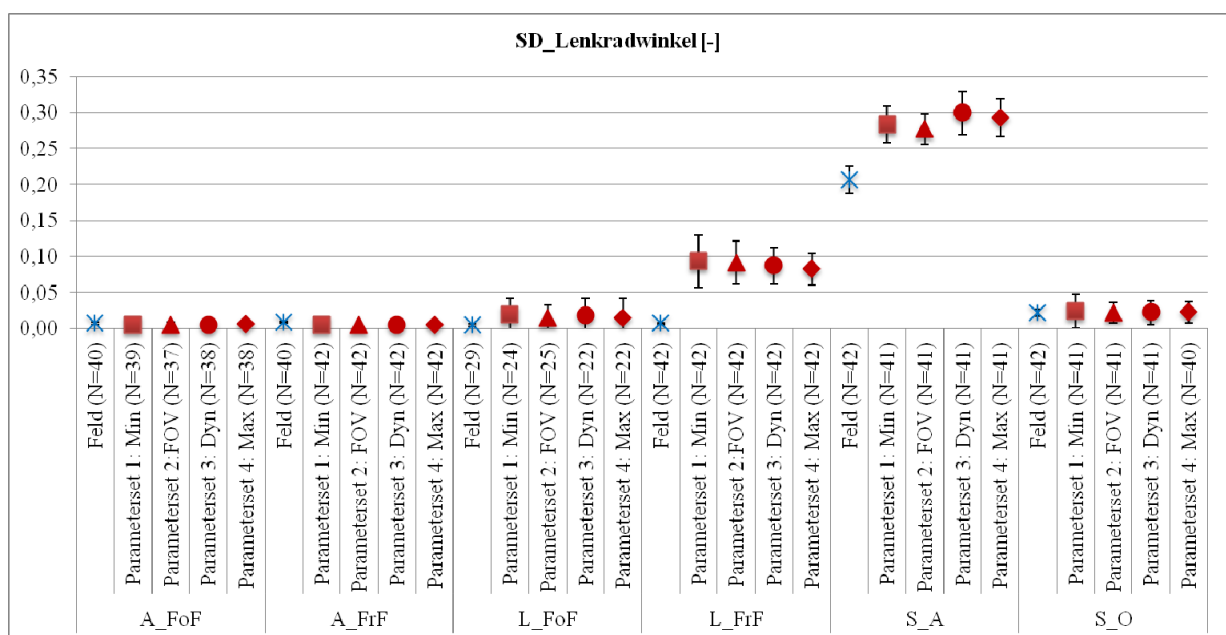
$p = 0,000$). Die Betrachtung der Varianzanalyse zeigt zudem, dass es auch hier keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors gibt.

Auf der *Landstraße* liegen die Werte der Standardabweichung Gaspedalstellung erwartungsgemäß unter denen der Autobahn, da hier weniger Brems- und Beschleunigungsvorgänge bspw. vor oder nach einem Überholvorgang stattfinden.

Dennoch liegen auch hier die Werte bei der *Folgefahrt* im Feld deutlich unter denen der vier Parametersets im Fahrsimulator. Dieser Unterschied erweist sich durchweg als signifikant; es liegt keine absolute Validität für diesen Kennwert vor (LH₁: $z = -3,328$; $p = 0,001$; LH₂: $z = -3,910$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -2,978$; $p = 0,003$; LH₄: $z = -2,983$; $p = 0,003$). Die Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigt einen signifikanten Einfluss der Variable Parameterset auf die Ergebnisse ($\chi^2(3) = 11,475$; $p = 0,008$). Eine nähere Betrachtung dieses Ergebnisses im Rahmen einer Post-hoc-Analyse zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen Parameterset 1 und 3 ($p = 0,012^b$) sowie Parameterset 2 und 4 ($p = 0,000^b$).

Im Szenario *Freie Fahrt Landstraße* liegen die Werte im Feld und im Fahrsimulator in einem ähnlichen Wertebereich wie bei der Folgefahrt. Auch hier erweist sich der Unterschied zwischen Feld und Fahrsimulator für alle Parametersets als signifikant (LH₁: $z = -5,645$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -5,645$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -5,645$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -5,645$; $p = 0,000$). Die Betrachtung der Varianzanalyse zeigt, dass es keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors gibt.

Standardabweichung Lenkradwinkel:



Die Kennwerte Standardabweichung Lenkradwinkel und Gierrate werden für alle Szenarien betrachtet. Die deskriptiven Daten für den Kennwert der Standardabweichung Lenkradwinkel finden sich in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

	A_FoF	A_FrF	L_FoF	L_FrF
Feld	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,00$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,00$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 0,00$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,00$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,02$	$\bar{x} = 0,09$ $\sigma = 0,04$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,00$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,02$	$\bar{x} = 0,09$ $\sigma = 0,03$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 0,00$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,00$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,02$	$\bar{x} = 0,09$ $\sigma = 0,03$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,03$	$\bar{x} = 0,08$ $\sigma = 0,02$

	S_A	S_O
Feld	$\bar{x} = 0,21$ $\sigma = 0,02$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,00$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 0,28$ $\sigma = 0,03$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,02$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 0,28$ $\sigma = 0,02$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,01$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 0,30$ $\sigma = 0,03$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,02$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 0,29$ $\sigma = 0,03$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,02$

Für die Standardabweichung des Lenkradwinkels ergibt sich bei einer *Folgefahrt* auf der *Autobahn* auf den ersten Blick ein relativ ähnliches Ergebnis zwischen Feld und Fahrsimulator. Dennoch erweist sich auch dieser minimale Unterschied bei einer statistischen Überprüfung als signifikant für alle Parametersets (LH₁: $z = -4,850$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -3,309$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -3,786$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -3,126$; $p = 0,002$). Die Varianzanalyse mit Messwiederholung im Rahmen von Hypothesenüberprüfung LH₅ zeigt keinen signifikanten Einfluss der Parametersets.

Auch bei der *Freien Fahrt* auf der *Autobahn* erscheint der Unterschied zwischen Feld und den Fahrsimulatorfahrten marginal. Der Unterschied ist jedoch wiederum signifikant, wie eine statistische Überprüfung zeigt (LH₁: $z = -5,511$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -5,497$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -5,484$; $p = 0,000$; LH₄: $z = 5,000$; $p = 0,000$). Die Betrachtung der Varianzanalyse zeigt zudem, dass es keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors gibt.

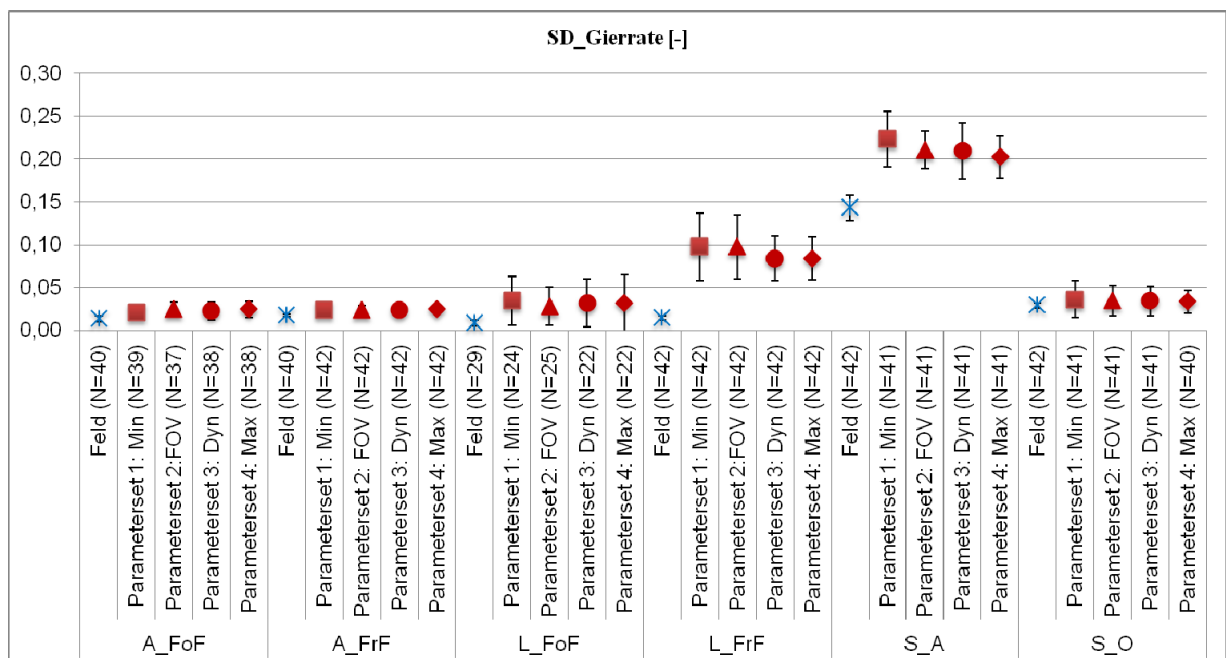
Bei der *Folgefahrt* auf der *Landstraße* ergeben sich für Feld und Fahrsimulator ähnlich geringe Werte wie bei der Autobahn. Die statistische Überprüfung der Unterschiede zeigt auch hier Signifikanz und somit fehlende absolute Validität für alle Parametersets (LH₁: $z = -3,523$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -3,458$; $p = 0,001$; LH₃: $z = -2,777$; $p = 0,005$; LH₄: $z = -3,375$; $p = 0,001$). Die Überprüfung von LH₅ zeigt zudem keinen signifikanten Unterschied zwischen den Parametersets ($\chi^2(3) = 2,025$; $p = 0,589$).

Bei der *Freien Fahrt* auf der *Landstraße* ergibt sich erstmalig ein deutlicher Unterschied zwischen den Werten im Feld und im Fahrsimulator. Die statistische Überprüfung verwundert entsprechend nicht; es ergeben sich für alle Parametersets signifikante Unterschiede (LH₁: $z = -5,645$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -5,645$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -5,645$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -5,645$; $p = 0,000$). Auch hier lässt die Varianzanalyse mit Messwiederholung keinen signifikanten Einfluss der Parametersets erkennen.

Erwartungsgemäß liegen die Werte der Standardabweichung Lenkradwinkel im Szenario *Stadt Abbiegevorgänge* noch deutlich höher als in den anderen Szenarien. Die Überprüfung der Hypothesen LH₁ bis LH₄ führt auch hier zum Ablehnen absoluter Validität (LH₁: $z = -5,579$; $p = 0,000$; LH₂: $t(40) = -15,749$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -5,570$; $p = 0,000$; LH₄: $t(40) = -18,170$; $p = 0,000$). Es zeigt sich jedoch ein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors und somit der Parametersets auf die Ergebnisse ($F(2,379) = 9,977$; $p = 0,000$). Eine nähere Betrachtung identifiziert einen signifikanten Unterschied zwischen Parameterset 1 und 3 ($p = 0,002$), Parameterset 2 und 3 ($p = 0,000$) sowie 2 und 4 ($p = 0,000$).

Auch die Betrachtung der deskriptiven Werte im Szenario *Stadt Ohne Richtungsänderung* verwundert nicht, da die Werte in einem ähnlich niedrigen Bereich liegen wie auf Autobahn und Landstraße. Auf den ersten Blick scheint wiederum der Unterschied zwischen Feld und Fahr Simulator vernachlässigbar. Allerdings führt auch hier die statistische Überprüfung zu der Erkenntnis fehlender absoluter Validität aufgrund eines signifikanten Unterschieds zwischen Feld und allen Parametersets (LH₁: $z = -3,648$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -3,337$; $p = 0,001$; LH₃: $z = -3,246$; $p = 0,001$; LH₄: $z = -2,527$; $p = 0,012$). Die Varianzanalyse mit Messwiederholung im Rahmen von Hypothesenüberprüfung LH₅ zeigt keinen signifikanten Einfluss der Parametersets.

Standardabweichung Gierrate:



Die deskriptiven Daten für den Kennwert der Standardabweichung Gierrate finden sich für alle Szenarien in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

	A_FoF	A_FrF	L_FoF	L_FrF
Feld	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,00$	$\bar{x} = 0,01$ $\sigma = 0,00$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,01$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,01$	$\bar{x} = 0,03$ $\sigma = 0,03$	$\bar{x} = 0,10$ $\sigma = 0,04$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,01$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,01$	$\bar{x} = 0,03$ $\sigma = 0,02$	$\bar{x} = 0,10$ $\sigma = 0,04$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,01$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,01$	$\bar{x} = 0,03$ $\sigma = 0,03$	$\bar{x} = 0,08$ $\sigma = 0,03$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,01$	$\bar{x} = 0,02$ $\sigma = 0,01$	$\bar{x} = 0,03$ $\sigma = 0,03$	$\bar{x} = 0,08$ $\sigma = 0,02$

	S_A	S_O
Feld	$\bar{x} = 0,14$ $\sigma = 0,01$	$\bar{x} = 0,03$ $\sigma = 0,00$
Parameterset 1: Min	$\bar{x} = 0,22$ $\sigma = 0,03$	$\bar{x} = 0,04$ $\sigma = 0,02$
Parameterset 2: FOV	$\bar{x} = 0,21$ $\sigma = 0,02$	$\bar{x} = 0,03$ $\sigma = 0,02$
Parameterset 3: Dyn	$\bar{x} = 0,21$ $\sigma = 0,03$	$\bar{x} = 0,03$ $\sigma = 0,02$
Parameterset 4: Max	$\bar{x} = 0,20$ $\sigma = 0,02$	$\bar{x} = 0,03$ $\sigma = 0,01$

Die Standardabweichung der Gierrate unterscheidet sich im Szenario *Autobahn Folgefahrt* zwischen Feld und den vier Fahr Simulatorfahrten kaum. Dennoch ergibt die statistische Auswertung der Hypothesen LH₁ bis LH₄ signifikante Ergebnisse für alle Parametersets und somit das Ablehnen absoluter Validität (LH₁: $t(36) = -6,767$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -4,619$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -5,027$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -4,792$; $p = 0,000$). Die Betrachtung der Varianzanalyse zeigt keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors.

Bei der *Freien Fahrt* auf der *Autobahn* fällt das Ergebnis zwischen Feld und Simulator auf den ersten Blick noch ähnlicher aus. Dennoch führt auch hier eine weitere Betrachtung zu der Erkenntnis eines signifikanten Unterschieds für alle Parametersets (LH₁: $t(39) = -7,575$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -4,960$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -5,511$; $p = 0,000$; LH₄: $t(39) = 68,149$; $p = 0,000$). Auch bei der Freien Fahrt zeigt sich kein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors und somit des Parametersets auf die Ergebnisse ($F(2,277) = 2,429$; $p = 0,086$).

Bei der *Folgefahrt* auf der *Landstraße* lässt sich bereits bei einer Betrachtung der deskriptiven Daten ein Unterschied zwischen der realen Versuchsumgebung und den Fahr Simulatorfahrten erkennen. Entsprechend verwundern die Ergebnisse der Mittelwertvergleiche in diesem Fall nicht, ergeben sie doch für alle Fahr Simulatorfahrten signifikante Unterschiede zu den Feldergebnissen (LH₁: $z = -4,107$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -4,015$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -3,783$; $p = 0,000$; LH₄: $z = -3,680$; $p = 0,000$). Auch hier zeigt die Varianzanalyse im Rahmen von Hypothesenüberprüfung LH₅ keinen signifikanten Einfluss des Messwiederholungsfaktors.

Noch deutlicher als bei der Folgefahrt fällt die Differenz zwischen beiden Untersuchungsumgebungen bei der *Freien Fahrt* auf *Landstraße* aus. Die Standardabweichung Gierrate liegt in realer Umgebung deutlich unter den Werten im Fahr Simulator. Auch diese Unterschiede erweisen sich allesamt als signifikant, was zu einer Ablehnung absoluter Validität führt (LH₁: $z = -5,645$; $p = 0,000$; LH₂: $z = -5,645$; $p = 0,000$; LH₃: $z = -5,645$; $p = 0,000$; LH₄:

$z = -5,645$; $p = 0,000$). Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung kommt zu dem Ergebnis eines signifikanten Einflusses der Parametersets auf die Ergebnisse ($F(2,059) = 4,827$; $p = 0,010$). Eine Post-hoc-Analyse zeigt, dass sich Parameterset 1 und 3 signifikant unterscheiden ($p = 0,028$).

Bei *Abbiegevorgängen innerstädtisch* liegt die Standardabweichung im Feld deutlich unter den Werten im Fahrsimulator. Die statistische Überprüfung der Hypothesen zur absoluten Validität zeigt für alle Parametersets Signifikanz (LH_1 : $z = -5,579$; $p = 0,000$; LH_2 : $z = -5,579$; $p = 0,000$; LH_3 : $t(40) = 61,076$; $p = 0,000$; LH_4 : $z = -5,566$; $p = 0,000$). Auch hier ergibt sich im Rahmen von Hypothesenüberprüfung LH_5 ein signifikanter Einfluss des Messwiederholungsfaktors ($F(2,243) = 8,543$; $p = 0,000$), der in einem signifikanten Unterschied zwischen Parameterset 1 und 2 ($p = 0,002$), 1 und 3 ($p = 0,033$) sowie 1 und 4 ($p = 0,000$) begründet liegt.

Bei *innerstädtischen Abschnitten Ohne Richtungsänderung* hingegen fällt der Unterschied zwischen Feld und den Fahrten in simulierter Umgebung weniger deutlich aus. Dies spiegelt sich auch in der statistischen Auswertung wieder, bei der der Unterschied zwischen Feld und allen vier Parametersets nicht signifikant ausfällt.

Ergebnistabellen Hypothesenprüfung

Fahrdynamikkennwerte:

Absoluter Vergleich zwischen Feld und Simulator (Analyseschritt 1, LH₁-LH₄)

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte			Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df	p		
M_Geschwindigkeit	A_FrF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-1,183	-	0,237	0,348	0,084
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	0,105	39	0,917	0,239	0,024
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-Test	0,493	39	0,624	0,420	0,026
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	0,260	39	0,624	0,312	0,001
	L_FrF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	T-Test	3,972	41	0,000	0,152	0,613
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-3,470	-	0,001	-0,194	0,538
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-Test	3,989	41	0,000	0,113	0,616
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	2,570	41	0,014	0,355	0,397
	S_A	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	T-Test	-18,620	40	0,000	0,098	2,931
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	-17,649	40	0,000	0,091	2,780
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-5,579	-	0,000	0,176	2,468
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-5,566	-	0,000	-0,010	2,527
	S_O	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-5,268	-	0,000	0,363	1,372
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-5,138	-	0,000	0,313	1,290
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-5,112	-	0,000	0,192	1,135
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-4,906	-	0,000	0,274	1,192
Max_Geschwindigkeit	A_FrF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	T-Test	-2,796	39	0,008	0,400	0,426
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	-2,691	39	0,010	0,306	0,421
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-Test	-1,877	39	0,068	0,409	0,366
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	-1,846	39	0,072	0,309	0,343
	L_FrF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-3,932	-	0,000	0,077	0,723
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-3,007	-	0,003	-0,142	0,518
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-4,458	-	0,000	0,023	0,847
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-4,433	-	0,000	0,228	0,766

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte			Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df	p		
M_Abstand	A_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	T-Test	-3,319	36	0,002	0,081	0,508
		LH ₂ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	T-Test	-4,675	34	0,000	0,044	0,782
		LH ₃ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	T-Test	-5,286	35	0,000	0,206	0,877
		LH ₄ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	T-Test	-3,993	36	0,000	0,056	0,669
	L_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-0,438	-	0,661	0,044	0,138
		LH ₂ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-1,825	-	0,068	0,025	0,283
		LH ₃ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-1,248	-	0,212	0,094	0,348
		LH ₄ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-0,936	-	0,349	0,371	0,155
	A_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-0,038	-	0,970	0,197	0,151
		LH ₂ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-1,081	-	0,280	0,104	0,086
		LH ₃ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-2,561	-	0,010	0,349	0,403
		LH ₄ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-2,120	-	0,034	0,350	0,379
	L_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-1,185	-	0,236	-0,041	0,294
		LH ₂ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-0,539	-	0,590	0,233	0,213
		LH ₃ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-1,167	-	0,243	-0,055	0,181
		LH ₄ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-1,982	-	0,048	0,515	0,657
M_TTC	A_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-5,288	-	0,000	0,448	2,824
		LH ₂ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-5,110	-	0,000	-0,057	2,028
		LH ₃ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-4,666	-	0,000	-0,106	1,632
		LH ₄ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-5,212	-	0,000	-0,147	2,100
	L_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-3,133	-	0,002	-0,413	1,082
		LH ₂ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-3,736	-	0,000	0,119	1,363
		LH ₃ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-3,058	-	0,002	-0,361	1,220
		LH ₄ ($\mu_{\text{feld}} \neq \mu_{\text{set}}$)	Wilcoxon	-3,462	-	0,001	0,089	1,557

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)		
				t/z	df				
Min_TTC	A_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-4,941	-	0,000	0,318	1,267	
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-4,570	-	0,000	-0,048	0,479	
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	T-Test	6,783	35	0,000	0,134	1,178	
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-3,990	-	0,000	-0,098	0,178	
	L_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-3,068	-	0,002	-0,175	0,932	
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	T-Test	4,907	20	0,000	0,386	1,037	
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-2,978	-	0,003	-0,052	0,898	
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-3,549	-	0,000	0,379	1,206	
	SD_Gaspedalstellung	A_FrF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	T-Test	-6,577	39	0,000	0,318	1,072
			LH ₂ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	T-Test	-7,627	39	0,000	0,318	1,132
			LH ₃ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	T-Test	-6,730	39	0,000	0,399	1,114
			LH ₄ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	T-Test	-6,960	39	0,000	0,435	1,147
		L_FrF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	0,000	-0,025	2,843
			LH ₂ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	0,000	-0,047	2,702
			LH ₃ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	0,000	0,124	3,943
			LH ₄ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	0,000	0,213	3,139
A_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	T-Test	-5,548	36	0,000	0,087	0,969		
	LH ₂ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-3,538	-	0,000	-0,046	2,703		
	LH ₃ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	T-Test	-3,935	35	0,000	0,075	0,728		
	LH ₄ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	T-Test	-3,474	36	0,001	0,279	0,629		
L_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-3,328	-	0,001	-0,014	1,359		
	LH ₂ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-3,910	-	0,000	0,635	2,536		
	LH ₃ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-2,978	-	0,003	0,017	1,062		
	LH ₄ ($\mu_{\text{Feid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	Wilcoxon	-2,983	-	0,003	0,447	1,524		

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df		
SD_Lenkradwinkel	A_FrF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-5,511	-	-0,072	2,812
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-5,497	-	-0,256	2,616
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-5,484	-	-0,167	2,506
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-5,000	-	0,049	1,699
	L_FrF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	-0,026	2,358
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	0,216	2,810
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	-0,041	3,136
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	0,238	3,429
	A_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-4,850	-	-0,019	1,199
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,309	-	-0,168	0,433
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,786	-	0,054	0,816
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,126	-	0,003	0,410
	L_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,523	-	-0,020	0,593
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,458	-	0,155	0,507
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-2,777	-	-0,432	0,569
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,375	-	-0,256	0,368
S_A	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-5,579	-	-0,057	2,335	
	LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	-15,749	40	0,032	2,478	
	LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-5,570	-	-0,254	2,301	
	LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	-18,170	40	0,166	2,855	
S_O	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,648	-	-0,138	0,086	
	LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,337	-	-0,043	0,028	
	LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,246	-	-0,045	0,015	
	LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-2,527	-	-0,010	0,030	

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df		
SD_Gierrate	A_FrF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	T-Test	-7,575	39	0,000	0,035
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-4,960	-	0,000	-0,067
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-5,511	-	0,000	0,092
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	T-Test	68,149	39	0,000	0,043
	L_FrF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	0,000	0,018
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	0,000	0,111
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	0,000	0,019
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-5,645	-	0,000	0,244
	A_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	T-Test	-6,767	36	0,000	0,005
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-4,619	-	0,000	-0,263
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-5,027	-	0,000	0,045
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-4,792	-	0,000	-0,070
	L_FoF	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-4,107	-	0,000	0,010
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-4,015	-	0,000	0,232
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-3,783	-	0,000	-0,370
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-3,680	-	0,000	-0,196
S_A	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-5,579	-	0,000	-0,014	
	LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-5,579	-	0,000	-0,021	
	LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	T-Test	61,076	40	0,000	0,127	
	LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-5,566	-	0,000	-0,021	
S_O	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,898	-	0,058	-0,184	
	LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,730	-	0,084	-0,048	
	LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,924	-	0,054	0,262	
	LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,761	-	0,078	-0,064	

Fahrerverhaltenskennwerte:Absoluter Vergleich zwischen Feld und Simulator (Analyseschritt 1, LH₁-LH₄)

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df		
Fixationsdauer Ampel/Schild	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-0,617	-	0,537	0,002
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-1,033	-	0,301	0,278
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-0,080	-	0,936	0,044
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-0,703	-	0,482	0,157
	L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-1,313	-	0,189	0,061
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-1,367	-	0,172	0,125
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-1,457	-	0,145	0,157
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-0,319	-	0,750	0,066
	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-1,635	-	0,102	0,477
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-2,949	-	0,003	0,605
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-1,008	-	0,313	0,281
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-2,821	-	0,005	0,467
Fixationsdauer Gegenverkehr	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-3,018	-	0,003	0,434
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-1,115	-	0,265	0,232
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-3,411	-	0,001	0,511
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-3,206	-	0,001	0,449
	L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-1,372	-	0,170	0,381
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-1,398	-	0,162	0,330
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-1,878	-	0,060	0,105
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-1,619	-	0,105	0,095

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte			Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df	p		
Fixationsdauer Gegenverkehr	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	1,905	32	0,066	0,227	0,419
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	2,055	36	0,047	0,348	0,431
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	4,781	37	0,000	0,197	0,810
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	0,681	37	0,000	0,149	0,793
Fixationsdauer Tacho	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-1,814	-	0,070	0,070	0,497
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-1,954	-	0,51	0,187	0,408
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-2,110	-	0,035	-0,169	0,489
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-1,922	-	0,055	-0,080	0,390
Fixationsdauer Verkehr	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-2,293	-	0,022	-0,162	0,424
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-2,309	-	0,021	-0,131	0,501
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	-3,945	37	0,000	0,052	0,661
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-2,896	-	0,004	0,082	0,541
Fixationsdauer Verkehr	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-2,743	-	0,006	-0,198	0,684
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,628	-	0,000	-0,188	0,666
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-4,720	-	0,000	0,043	1,010
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-4,126	-	0,000	0,089	0,868
Fixationsdauer Verkehr	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	5,559	31	0,000	0,191	0,808
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-4,126	-	0,000	0,038	0,880
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	7,126	37	0,000	0,335	1,201
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	4,141	37	0,000	0,213	0,717

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)	
				t/z	df			
Fixationsdauer Verkehr	L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-0,666	-	0,171	0,054	
		LH ₂ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-0,047	-	0,311	0,001	
		LH ₃ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-0,515	-	0,208	0,085	
		LH ₄ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-1,157	-	0,161	0,115	
	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	4,675	32	0,000	0,077	0,832
		LH ₂ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	5,420	36	0,000	0,227	0,927
		LH ₃ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	6,219	37	0,000	0,250	1,047
		LH ₄ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	6,264	37	0,000	0,295	1,056
	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-2,936	-	0,191	0,726	
		LH ₂ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-4,352	-	0,000	0,274	0,981
		LH ₃ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-2,879	-	0,004	-0,013	0,631
		LH ₄ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-3,662	-	0,000	0,295	0,749
L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	-0,369	30	0,715	0,013	0,060	
	LH ₂ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	0,223	35	0,825	0,284	0,055	
	LH ₃ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	1,579	37	0,123	0,321	0,236	
	LH ₄ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	2,533	41	0,015	0,344	0,391	
S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	-2,123	32	0,042	0,416	0,359	
	LH ₂ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	-2,011	36	0,052	0,284	0,344	
	LH ₃ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	T-Test	-0,349	37	0,729	0,386	0,083	
	LH ₄ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Setz}}$)	Wilcoxon	-0,660	-	0,509	0,192	0,242	

Kennwert	Szenario	Hypothesekategorie	Testart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df		
Fixationsdauer Straße	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setl}}$)	Wilcoxon	-0,879	-	0,379	0,270
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	2,074	36	0,045	0,356
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-0,065	-	0,948	0,007
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	1,603	37	0,117	0,261
	L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-0,823	-	0,410	0,116
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	0,276	35	0,784	0,034
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-Test	-1,209	37	0,234	0,197
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	0,309	41	0,759	0,048
	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	T-Test	-1,358	32	0,184	0,247
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	-2,035	36	0,049	0,338
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-Test	-3,336	37	0,002	0,537
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	-2,469	37	0,018	0,396
Fixationsdauer Sonstiges	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-4,937	-	0,000	1,281
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-5,303	-	0,000	1,304
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-5,373	-	0,000	1,279
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-5,373	-	0,000	1,280
	L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-4,429	-	0,000	0,578
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-5,090	-	0,000	0,596
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-4,227	-	0,000	0,313
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-3,770	-	0,000	0,267

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte			Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df	p		
Fixationsdauer Sonstiges	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setl}}$)	Wilcoxon	-4,387	-	0,000	-0,008	1,272
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-5,046	-	0,000	0,007	1,715
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-4,822	-	0,000	0,288	1,299
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-5,373	-	0,000	0,401	2,435
Fixationshäufigkeit Ampel/Schild	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setl}}$)	Wilcoxon	-0,750	-	0,940	-0,336	0,111
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-1,411	-	0,158	-0,166	0,329
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-0,181	-	0,856	-0,189	0,077
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-1,167	-	0,243	-0,257	0,260
Fixationshäufigkeit Gegenverkehr	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setl}}$)	Wilcoxon	-1,607	-	0,108	0,111	0,063
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-1,037	-	0,300	0,059	0,097
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-1,240	-	0,215	0,009	0,155
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-0,456	-	0,648	0,037	0,032
Fixationsdauer Sonstiges	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setl}}$)	T-Test	-1,115	32	0,273	0,317	0,344
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	-3,040	36	0,004	0,216	0,575
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-Test	-0,565	37	0,576	0,474	0,169
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	-2,692	37	0,011	0,248	0,494
Fixationshäufigkeit Gegenverkehr	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Setl}}$)	Wilcoxon	-2,724	-	0,006	0,244	0,489
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-1,021	-	0,307	-0,005	0,227
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-3,325	-	0,001	0,319	0,544
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-3,086	-	0,002	0,297	0,505

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)	
				t/z	df			
Fixationshäufigkeit Gegenverkehr	L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,156	-	0,248	0,310	
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-0,990	-	0,322	0,249	
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,806	-	0,071	0,144	
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-2,094	-	0,036	0,189	
	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-2,510	-	0,012	0,500	
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,788	-	0,074	0,394	
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-4,010	-	0,000	0,829	
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-3,372	-	0,001	0,661	
	Fixationshäufigkeit Tacho	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,402	-	0,161	0,329
			LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-0,807	-	0,420	0,277
			LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,457	-	0,145	0,401
			LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,603	-	0,109	0,358
		L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-0,274	-	0,784	0,110
			LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,163	-	0,245	0,270
			LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	T-Test	-2,220	37	0,033	0,380
			LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-1,419	-	0,156	0,250
S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-2,189	-	0,029	0,474		
	LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-2,814	-	0,005	0,553		
	LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-4,256	-	0,000	0,822		
	LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Sett}}$)	Wilcoxon	-3,719	-	0,000	0,702		

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)	
				t/z	df			
Fixationshäufigkeit Verkehr	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set}}$)	T-Test	6,745	31	0,332	1,098	
		LH ₂ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	5,855	36	0,017	0,967	
L_G	L_G	LH ₃ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-Test	7,095	37	0,291	1,186	
		LH ₄ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	5,321	37	0,291	0,906	
		LH ₁ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-1,039	-	0,299	0,080	
		LH ₂ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-0,503	-	0,615	0,052	
S_G	S_G	LH ₃ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-0,935	-	0,350	0,165	
		LH ₄ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-1,657	-	0,098	0,185	
		LH ₁ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	T-Test	4,934	32	0,000	0,894	
		LH ₂ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	6,422	36	0,000	1,112	
Fixationshäufigkeit Umgebung	A_G	LH ₃ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-Test	6,882	37	0,000	1,174	
		LH ₄ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	7,754	37	0,000	1,320	
		LH ₁ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-2,992	-	0,003	0,727	
		LH ₂ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-4,473	-	0,000	1,017	
	L_G	L_G	LH ₃ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-2,850	-	0,004	0,599
			LH ₄ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-3,531	-	0,000	0,724
			LH ₁ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-0,607	-	0,544	0,136
			LH ₂ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	-0,084	35	0,934	0,000
L_G	L_G	LH ₃ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-1,399	-	0,162	0,177	
		LH ₄ ($\mu_{\text{Reid}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	2,276	41	0,028	0,351	

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte			Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df	p		
Fixationshäufigkeit Umgebung	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	T-T est	-2,661	32	0,012	0,442	0,458
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-T est	-2,795	36	0,008	0,312	0,476
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-T est	-0,559	37	0,579	0,385	0,122
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-1,196	-	0,232	0,161	0,317
Fixationshäufigkeit StraÙe	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	T-T est	-0,501	31	0,620	0,360	0,048
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-T est	0,838	36	0,408	0,363	0,157
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-0,979	-	0,328	-0,028	0,170
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-T est	0,288	37	0,775	0,241	0,053
Fixationshäufigkeit Sonstiges	L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	0,000	-	1,000	-0,134	0,016
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-T est	-0,477	35	0,636	0,168	0,084
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-T est	-2,059	37	0,047	0,111	0,324
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-T est	-0,186	41	0,853	0,032	0,029
Fixationshäufigkeit Sonstiges	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	T-T est	-0,680	32	0,501	0,457	0,127
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-T est	-1,120	36	0,270	0,451	0,184
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-T est	-2,895	37	0,006	0,254	0,460
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-T est	-1,882	37	0,068	0,307	0,295
Fixationshäufigkeit Sonstiges	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-4,937	-	0,000	0,281	0,045
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-5,303	-	0,000	0,457	0,169
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-5,373	-	0,000	0,028	0,175
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-5,373	-	0,000	0,218	0,052

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df		
Fixationshäufigkeit Sonstiges	L_G	$LH_1 (\mu_{read} \neq \mu_{set})$	Wilcoxon	-4,056	-	-0,025	0,639
		$LH_2 (\mu_{read} \neq \mu_{set})$	Wilcoxon	-4,933	-	-0,096	0,717
		$LH_3 (\mu_{read} \neq \mu_{set})$	Wilcoxon	-3,981	-	-0,047	0,352
		$LH_4 (\mu_{read} \neq \mu_{set})$	Wilcoxon	-3,145	-	-0,041	0,287
	S_G	$LH_1 (\mu_{read} \neq \mu_{set})$	Wilcoxon	-3,851	-	-0,040	0,921
		$LH_2 (\mu_{read} \neq \mu_{set})$	Wilcoxon	-4,835	-	0,055	0,148
		$LH_3 (\mu_{read} \neq \mu_{set})$	Wilcoxon	-3,937	-	0,259	0,461
		$LH_4 (\mu_{read} \neq \mu_{set})$	Wilcoxon	-5,170	-	0,327	0,298

Fahrerverhaltenskennwerte:Relativer Vergleich zwischen verschiedenen Parametersets (Analyseschritt 2, LH₅)

Kennwert	Hypothesen- kategorie			P (Mauchly -Test)	Test der Innersubjekteffekte			T-Test (Bonferroni) (p/2)							
	Szenario	Testbezeichnung	Test		F	df	p	LH ₅ 12 ($\mu_{set1} > \mu_{set2}$)	LH ₅ 13 ($\mu_{set1} < \mu_{set3}$)	LH ₅ 14 ($\mu_{set1} < \mu_{set4}$)	LH ₅ 23 ($\mu_{set2} < \mu_{set3}$)	LH ₅ 24 ($\mu_{set2} < \mu_{set4}$)	LH ₅ 34 ($\mu_{set3} < \mu_{set4}$)		
Fixationsdauer Ampel/Schild	A_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,065	2,230	3,000	0,090								
	L_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,005	2,865	2,129	0,061								
	S_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,603	2,882	3,000	0,040	0,331	0,375	0,500	0,041	0,500	0,500	0,208	
Fixationsdauer Gegenverkehr	A_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,549	2,334	3,000	0,079								
	L_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,000	4,859	1,763	0,015	0,500	0,091	0,215	0,021	0,062	0,500	0,500	
	S_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,678	5,128	3,000	0,003	0,500	0,032	0,272	0,007	0,062	0,500	0,500	
Fixationsdauer Tacho	A_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,750	1,571	3,000	0,202								
	L_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,815	0,881	3,000	0,454								
	S_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,006	3,202	2,230	0,042	0,500	0,037	0,500	0,145	0,500	0,160		
Fixationsdauer Verkehr	A_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,247	1,262	3,000	0,292								
	L_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,002	0,258	2,279	0,801								
	S_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,117	0,770	3,000	0,514								
Fixationsdauer Umgebung	A_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,014	1,362	2,356	0,263								
	L_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,572	2,497	3,000	0,065								
	S_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,097	2,596	3,000	0,057								
Fixationsdauer Strabe	A_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,002	2,526	2,330	0,079								
	L_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,008	3,531	2,185	0,031	0,500	0,012	0,255	0,224	0,500	0,500	0,500	
	S_G	Messwiederholung	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	0,717	3,437	3,000	0,020	0,500	0,026	0,471	0,053	0,341	0,500	0,500	

Kennwert	Hypothesen- kategorie			Testbezeichnung	P (Mauchly -Test)	Test der Innersubjekteffekte			T-Test (Bonferroni) (p/2)						
	Szenario	Szenario	Testbezeichnung			F	df	p	LH ₅ ¹² ($\mu_{set1} > \mu_{set2}$)	LH ₅ ¹³ ($\mu_{set1} > \mu_{set3}$)	LH ₅ ¹⁴ ($\mu_{set1} > \mu_{set4}$)	LH ₅ ²³ ($\mu_{set2} > \mu_{set3}$)	LH ₅ ²⁴ ($\mu_{set2} > \mu_{set4}$)	LH ₅ ³⁴ ($\mu_{set3} > \mu_{set4}$)	
Fixationsdauer Sonstiges	A_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,041	1,469	2,518	0,234								
	L_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,000	2,456	1,394	0,114								
	S_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,045	2,840	2,549	0,052								
Fixationshäufigkeit Ampel/Schild	A_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,240	2,394	3,000	0,074								
	L_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,085	2,399	3,000	0,073								
	S_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,582	4,248	3,000	0,007	0,219	0,381	0,500	0,010	0,500	0,500	0,017	
Fixationshäufigkeit Gegenverkehr	A_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,080	3,928	3,000	0,011	0,125	0,500	0,500	0,012	0,164	0,500	0,500	
	L_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,001	3,799	2,017	0,028	0,500	0,140	0,226	0,059	0,122	0,500	0,500	
	S_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,288	5,477	3,000	0,002	0,223	0,057	0,500	0,003	0,075	0,500	0,500	
Fixationshäufigkeit Tacho	A_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,161	2,052	3,000	0,112								
	L_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,173	1,382	3,000	0,254								
	S_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,001	3,288	2,275	0,037	0,500	0,022	0,500	0,160	0,500	0,500	0,208	
Fixationshäufigkeit Verkehr	A_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,345	1,279	3,000	0,287								
	L_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,005	0,452	2,292	0,665								
	S_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,009	1,116	2,248	0,338								
Fixationshäufigkeit Umgebung	A_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,068	1,693	3,000	0,174								
	L_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,506	2,412	3,000	0,072								
	S_G	LH ₅ ($\mu_{set1} \neq \mu_{set2}$)	Messwiederholung	0,099	3,084	2,594	0,039	0,500	0,007	0,500	0,058	0,500	0,500	0,211	

Kennwert	Hypothesen- kategorie			Testbezeichnung	P (Mauchly -Test)	Test der Innersubjektffekte			T-Test (Bonferroni) (p/2)						
	Szenario	H ₅ ($\mu_{seti} \neq \mu_{setii}$)	Testbezeichnung			F	df	p	LH _{5 12} ($\mu_{seti} > \mu_{set2}$)	LH _{5 13} ($\mu_{seti} > \mu_{set3}$)	LH _{5 14} ($\mu_{seti} > \mu_{set4}$)	LH _{5 23} ($\mu_{set2} > \mu_{set3}$)	LH _{5 24} ($\mu_{set2} > \mu_{set4}$)	LH _{5 34} ($\mu_{set3} > \mu_{set4}$)	
Fixationshäufigkeit Straße	A_G	LH ₅ ($\mu_{seti} \neq \mu_{setii}$)	Messwiederholung	0,014	2,254	2,437	0,101								
	L_G	LH ₅ ($\mu_{seti} \neq \mu_{setii}$)	Messwiederholung	0,018	2,824	2,281	0,060								
	S_G	LH ₅ ($\mu_{seti} \neq \mu_{setii}$)	Messwiederholung	0,504	3,264	3,000	0,025	0,500	0,026	0,500	0,055	0,427	0,500		
Fixationshäufigkeit Sonstiges	A_G	LH ₅ ($\mu_{seti} \neq \mu_{setii}$)	Messwiederholung	0,000	1,439	1,642	0,246								
	L_G	LH ₅ ($\mu_{seti} \neq \mu_{setii}$)	Messwiederholung	0,000	2,977	1,409	0,079								
	S_G	LH ₅ ($\mu_{seti} \neq \mu_{setii}$)	Messwiederholung	0,063	3,667	3,000	0,015	0,500	0,113	0,500	0,048	0,500	0,500	0,033	

Physiologische Kennwerte:Absoluter Vergleich zwischen Feld und Simulator (Analyseschritt 1, LH₁-LH₄)

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Testart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df		
ARHR_Median	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-3,433	-	0,248	0,650
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-4,197	-	0,577	0,866
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-3,248	-	0,337	0,584
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	5,765	38	0,431	0,008
	L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-2,717	-	0,357	0,408
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-4,100	-	0,638	0,774
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-2,093	-	0,371	0,366
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-4,314	-	0,452	0,772
	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	T-Test	4,601	38	0,359	0,030
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	T-Test	5,786	37	0,553	0,517
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-Test	3,056	35	0,274	0,315
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	T-Test	5,815	39	0,330	0,310
ARSCL_Median bzw. SCR- Amplitude_Median	A_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-1,384	-	-0,094	0,030
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-1,412	-	-0,004	0,195
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-0,360	-	0,008	0,060
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-0,240	-	-0,471	0,241
	L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-1,913	-	-0,131	0,185
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-1,092	-	0,104	0,227
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-1,936	-	-0,117	0,229
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-0,934	-	0,374	0,214

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Tstart	Testwerte		Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df		
ARSCL_Median bzw. SCR- Amplitude_Median	S_G	LH ₁ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	T-Test	-2,750	31	0,010	0,263
		LH ₂ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-4,297	-	0,000	0,272
		LH ₃ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-3,172	-	0,002	0,207
	A_G	LH ₄ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-3,030	-	0,002	0,302
		LH ₁ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-0,442	-	0,658	0,231
		LH ₂ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-1,214	-	0,225	-0,001
		LH ₃ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-0,264	-	0,792	-0,093
	L_G	LH ₄ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	0,718	-	0,477	0,221
		LH ₁ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-0,875	-	0,382	0,513
		LH ₂ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-1,049	-	0,294	0,140
		LH ₃ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-0,400	-	0,689	0,330
		LH ₄ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-0,875	-	0,382	0,192
S_G	LH ₁ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-0,007	-	0,994	0,395	
	LH ₂ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-3,140	-	0,002	0,095	
	LH ₃ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-1,914	-	0,056	0,350	
	LH ₄ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-2,121	-	0,034	0,107	
pNIN50	A_G	LH ₁ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-0,950	-	0,342	0,043
		LH ₂ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-0,468	-	0,640	0,092
		LH ₃ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-0,556	-	0,578	0,109
		LH ₄ ($\mu_{Feld} \neq \mu_{Set}$)	Wilcoxon	-0,047	-	0,962	0,215

Kennwert	Szenario	Hypothesenkategorie	Tstart	Testwerte			Korrelation r (Pearson)	Effektstärke (Cohen's d)
				t/z	df	p		
pNN50	L_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-0,880	-	0,379	0,460	0,207
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-0,267	-	0,789	-0,058	0,071
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	Wilcoxon	-0,817	-	0,414	0,058	0,061
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-1,429	-	0,153	0,472	0,154
	S_G	LH ₁ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set1}}$)	Wilcoxon	-0,318	-	0,751	0,950	0,067
		LH ₂ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set2}}$)	Wilcoxon	-2,074	-	0,038	-0,068	0,337
		LH ₃ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set3}}$)	T-Test	1,779	32	0,085	0,128	0,288
		LH ₄ ($\mu_{\text{Feld}} \neq \mu_{\text{Set4}}$)	Wilcoxon	-2,618	-	0,009	0,414	0,330

Expertenbefragung



Technische Universität Darmstadt
Institut für Arbeitswissenschaft
Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

iaD

Einwilligung zur Teilnahme

Alle persönlichen Angaben werden nur im Rahmen der Befragung verwendet und nicht veröffentlicht. Die Daten werden anonymisiert erfasst. Somit ist bei der Auswertung gewährleistet, dass keinerlei Rückschlüsse zwischen Ihren Angaben und Ihrer Person gezogen werden können. Ferner versichern wir, dass Ihre persönlichen Angaben nicht an Dritte weitergegeben werden.

Mit Ihrer Unterschrift bestätigen Sie die freiwillige Teilnahme an dieser Befragung.

Datum

Unterschrift



Technische Universität Darmstadt
Institut für Arbeitswissenschaft
Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

IAD

Angaben zur Person:

Geschlecht: männlich weiblich

Beruf: _____

Fachbereich / Forschungsschwerpunkt: _____

Universität / Institut: _____



Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

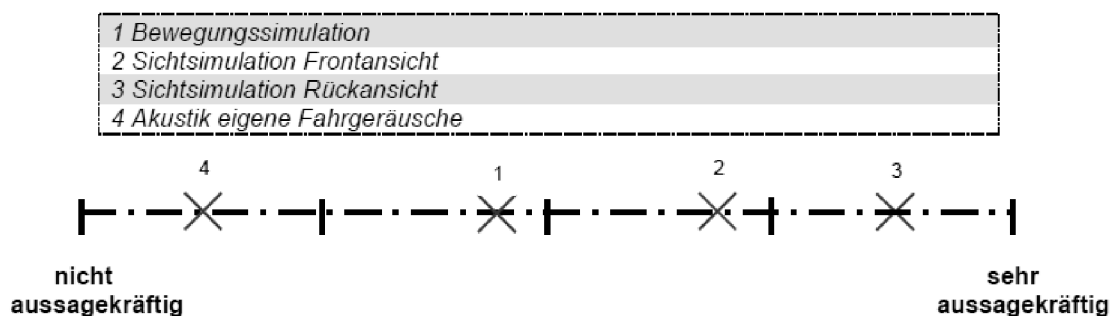
IAD

Fahrsimulatoren sind heutzutage integraler Bestandteil der Fahrzeugforschung, da Untersuchungen am realen System oftmals zu teuer, ethisch nicht vertretbar und zu gefährlich sind. Außerdem ermöglichen sie flexible Versuchsbedingungen. Kritisch zu hinterfragen ist allerdings, inwiefern die Übertragbarkeit der in simulierten Umgebungen erhobenen Daten auf reales Fahrverhalten gewährleistet ist. Um auf diese Frage eine adäquate Antwort zu finden, bedarf es einer entsprechenden Validierung der Fahrsimulatoren. In diesem Kontext spielen insbesondere die physikalische Validität und die Fahrerhaltensvalidität eine Rolle. Letztere gibt an, inwieweit das Fahrerhalten eines Probanden im Fahrsimulator dem unter realen Versuchsbedingungen im Feld entspricht. Die vorliegende Fragebogen-Studie dient der Erfassung relevanter Kennwerte für die Analyse der Fahrerhaltensvalidität. Dabei möchten wir von Ihnen als Experten wissen, welche der von uns vorgegebenen Kennwerte Sie für die Überprüfung der Fahrerhaltensvalidität im Allgemeinen sowie bzgl. ausgewählter Szenarien als besonders aussagekräftig erachten. Die Befragung besteht aus mehreren Blöcken und wird **ungefähr zehn Minuten** dauern.

Block 1:

In diesem Block möchten wir Sie bitten, die folgenden Aspekte hinsichtlich ihrer Aussagekraft bezüglich der Fahrverhaltensvalidität im Allgemeinen zu bewerten. Setzen Sie dazu bitte ein Kreuz mit der dazugehörigen Ziffer auf der Linie. Die Position des Kreuzes gibt Ihre Gesamtbewertung des jeweiligen Kennwertes wieder. Mit dem Abstand zwischen den Kreuzen können Sie die einzelnen Kennwerte genauer abstimmen und zueinander ins Verhältnis setzen.

Beispiel:





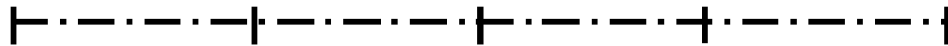
Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

IAD

Bitte nehmen Sie nun eine Bewertung für die folgenden Kennwerte vor:

I.

1 Geschwindigkeit	6 Gierrate
2 Gaspedalposition	7 Querbeschleunigung
3 Längsbeschleunigung	8 Lenkradwinkel
4 laterale Position	9 Lenkradrückstellrate
5 TLC (time to line crossing)	

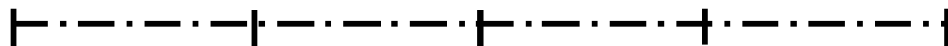


nicht
aussagekräftig

sehr
aussagekräftig

II.

1 Verzögerung/Reaktionszeit	6 Abstand zum Vorausfahrenden
2 Bremspedalposition	7 TTC (time to collision)
3 Bremskraft	
4 Aufgabendauer d. potentiellen Nebenaufgabe	
5 Reaktionszeit bis zum Beginn einer potentiellen Nebenaufgabe	

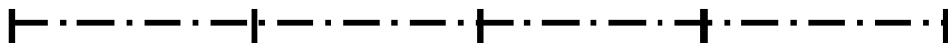


nicht
aussagekräftig

sehr
aussagekräftig

III.

1 gleichmäßiges Lenkverhalten	3 Blickbewegung
2 Kopfbewegungen	4 Bedientätigkeit von Instrumenten



nicht
aussagekräftig

sehr
aussagekräftig

IV.

1 Hautleitwert	6 Blutdruck
2 Hautwiderstand	7 Atemfrequenz
3 Hauttemperatur	8 Arrhythmie (Herzfrequenzabweichung)
4 subjektives Realitätsempfinden	9 Herzschlagrate
5 Muskelaktivität	10 Workload (NASA-TLX)



nicht
aussagekräftig

sehr
aussagekräftig



Technische Universität Darmstadt
Institut für Arbeitswissenschaft
Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

IAD

Block 2:

Wir möchten Sie nun bitten die nachfolgenden vier Kennwerte-Kategorien nach ihrer Relevanz zu gewichten. Dabei geht es uns um Ihre persönliche Einschätzung, es gibt daher kein „richtig“ oder „falsch“. Vergeben Sie dazu bitte die Zahlen 1 bis 4, wobei die Zahl 4 die maximal mögliche Gewichtung darstellt, die Zahl 1 entsprechend die geringst mögliche. Sie dürfen dabei auch mehreren Kennwerten dieselbe Nummer zuordnen und somit eine Gleichgewichtung vornehmen.

- I. objektive Fahrdynamik-Kennwerte (z.B. Bremskraft & Beschleunigung): _____
- II. objektive Fahrerhaltens-Kennwerte (z.B. Blick- & Kopfbewegungen): _____
- III. objektive physiologische Kennwerte (z.B. Hautleitwert & Blutdruck): _____
- IV. subj. Empfindungen des Fahrers (z.B. Workload & subjekt. Realitätsempfinden): _____



Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

IAD

Block 3:

In diesem Abschnitt stellen wir Ihnen nun nacheinander drei verschiedene Szenarien vor und bitten Sie erneut um eine Beurteilung der Ihrer Meinung nach relevanten Kennwertgrößen für das jeweilige Szenario.

Szenario A:

Bei diesem Szenario handelt es sich um eine Stadtfahrt. Dabei beträgt die zulässige Geschwindigkeit in der Regel zwischen 30 und 50km/h. Die Umgebung ist geprägt durch Kreuzungen, Ampeln, Verkehrszeichen wie z.B. Stoppschilder und eine erhöhte Verkehrsdichte. Abbiege- und Bremsvorgänge treten vermehrt auf.

Stellen Sie sich vor Sie wollten das oben beschriebene Szenario A an Ihrem Fahrsimulator erheben. Welche der im Nachfolgenden aufgeführten Kennwerte / Indikatoren würden Sie zur Validitätsbestimmung als wichtig erachten? Bitte kreuzen Sie jeden für Sie relevanten Kennwert an.

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Verzögerung/Reaktionszeiten | <input type="checkbox"/> Abstand zum Vorausfahrenden |
| <input type="checkbox"/> laterale Position | <input type="checkbox"/> Hautwiderstand |
| <input type="checkbox"/> Herzschlagrate | <input type="checkbox"/> TTC (time to collision) |
| <input type="checkbox"/> Kopfbewegungen | <input type="checkbox"/> Bremspedalposition |
| <input type="checkbox"/> Längsbeschleunigung | <input type="checkbox"/> Atemfrequenz |
| <input type="checkbox"/> Querschleunigung | <input type="checkbox"/> gleichmäßiges Lenkverhalten |
| <input type="checkbox"/> Gierrate | <input type="checkbox"/> Arrhythmie (Herzfrequenzabweichung) |
| <input type="checkbox"/> Lenkradrückstellrate | <input type="checkbox"/> TLC (time to line crossing) |
| <input type="checkbox"/> Geschwindigkeit | <input type="checkbox"/> Bedientätigkeit von Instrumenten |
| <input type="checkbox"/> Hauttemperatur | <input type="checkbox"/> Bremskraft |
| <input type="checkbox"/> Muskelaktivität | <input type="checkbox"/> Workload (NASA-TLX) |
| <input type="checkbox"/> Blickbewegung | <input type="checkbox"/> Lenkradwinkel |
| <input type="checkbox"/> Blutdruck | <input type="checkbox"/> subjektives Realitätsempfinden |
| <input type="checkbox"/> Hautleitwert | <input type="checkbox"/> Gaspedalposition |

Weitere Kennwerte:



Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

IAD

Szenario B:

Dieses Szenario beschreibt eine **Landstraßen- oder Überlandfahrt**. Entsprechend sind zulässige Geschwindigkeiten von 50 bis 100km/h zu erwarten. Die Strecke umfasst einen Fahrstreifen je Fahrtrichtung und ist kurvenreich. Ferner ist mit Waldpassagen und teils verengter Fahrbahn zu rechnen.

Stellen Sie sich nun vor Sie wollten das oben beschriebene Szenario B an Ihrem Fahrsimulator erheben. Welche der im Nachfolgenden aufgeführten Kennwerte / Indikatoren würden Sie zur Validitätsbestimmung als wichtig erachten? Bitte kreuzen Sie jeden für Sie relevanten Kennwert an.

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Verzögerung/Reaktionszeiten | <input type="checkbox"/> Abstand zum Vorausfahrenden |
| <input type="checkbox"/> laterale Position | <input type="checkbox"/> Hautwiderstand |
| <input type="checkbox"/> Herzschlagrate | <input type="checkbox"/> TTC (time to collision) |
| <input type="checkbox"/> Kopfbewegungen | <input type="checkbox"/> Bremspedalposition |
| <input type="checkbox"/> Längsbeschleunigung | <input type="checkbox"/> Atemfrequenz |
| <input type="checkbox"/> Querschleunigung | <input type="checkbox"/> gleichmäßiges Lenkverhalten |
| <input type="checkbox"/> Gierrate | <input type="checkbox"/> Arrhythmie (Herzfrequenzabweichung) |
| <input type="checkbox"/> Lenkradrückstellrate | <input type="checkbox"/> TLC (time to line crossing) |
| <input type="checkbox"/> Geschwindigkeit | <input type="checkbox"/> Bedientätigkeit von Instrumenten |
| <input type="checkbox"/> Hauttemperatur | <input type="checkbox"/> Bremskraft |
| <input type="checkbox"/> Muskelaktivität | <input type="checkbox"/> Workload (NASA-TLX) |
| <input type="checkbox"/> Blickbewegung | <input type="checkbox"/> Lenkradwinkel |
| <input type="checkbox"/> Blutdruck | <input type="checkbox"/> subjektives Realitätsempfinden |
| <input type="checkbox"/> Hautleitwert | <input type="checkbox"/> Gaspedalposition |

Weitere Kennwerte:



Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

IAD

Szenario C:

Bei Szenario C handelt es sich um eine **Autobahnfahrt** oder die Fahrt auf einer **autobahnähnlichen Landstraße**, die mindestens zwei Fahrstreifen je Richtung umfasst. Es sind Seitenstreifen vorhanden und es ist mit Überholmanövern und entsprechend Spurwechseln zu rechnen. Gegebenenfalls werden den Probanden parallel zur Hauptaufgabe, der Fahrzeugführung, noch fahrfremde Nebenaufgaben (z.B. Bedienen eines Navigationsgerätes, Telefonieren) gestellt.

Stellen Sie sich nun vor Sie wollten das oben beschriebene Szenario C an Ihrem Fahr Simulator erheben. Welche der im Nachfolgenden aufgeführten Kennwerte / Indikatoren würden Sie zur Validitätsbestimmung als wichtig erachten? Bitte kreuzen Sie jeden für Sie relevanten Kennwert an.

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Verzögerung/Reaktionszeiten | <input type="checkbox"/> Abstand zum Vorausfahrenden |
| <input type="checkbox"/> laterale Position | <input type="checkbox"/> Hautwiderstand |
| <input type="checkbox"/> Herzschlagrate | <input type="checkbox"/> TTC (time to collision) |
| <input type="checkbox"/> Kopfbewegungen | <input type="checkbox"/> Bremspedalposition |
| <input type="checkbox"/> Längsbeschleunigung | <input type="checkbox"/> Atemfrequenz |
| <input type="checkbox"/> Querbeschleunigung | <input type="checkbox"/> gleichmäßiges Lenkverhalten |
| <input type="checkbox"/> Gierrate | <input type="checkbox"/> Arrhythmie (Herzfrequenzabweichung) |
| <input type="checkbox"/> Lenkradrückstellrate | <input type="checkbox"/> TLC (time to line crossing) |
| <input type="checkbox"/> Geschwindigkeit | <input type="checkbox"/> Bedientätigkeit von Instrumenten |
| <input type="checkbox"/> Hauttemperatur | <input type="checkbox"/> Bremskraft |
| <input type="checkbox"/> Muskelaktivität | <input type="checkbox"/> Workload (NASA-TLX) |
| <input type="checkbox"/> Blickbewegung | <input type="checkbox"/> Lenkradwinkel |
| <input type="checkbox"/> Blutdruck | <input type="checkbox"/> subjektives Realitätsempfinden |
| <input type="checkbox"/> Hautleitwert | <input type="checkbox"/> Gaspedalposition |
| <input type="checkbox"/> Aufgabendauer d. potentiellen Nebenaufgabe | |
| <input type="checkbox"/> Reaktionszeit bis zum Beginn einer potentiellen Nebenaufgabe | |

Weitere Kennwerte:



Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

IAD

Block 4 (optional!):

Zum Abschluss möchten wir Sie bitten die nachfolgenden zwei Fragen zu Ihrer eigenen Forschung zu beantworten.

1. Nennen Sie uns bitte die zwei Forschungsziele, die bei der Durchführung von Fahrsimulationsstudien an Ihrem Institut am meisten im Vordergrund stehen.

<u>Untersuchungsziel:</u>	<u>Prozentuale Gewichtung:</u>
1.	
2.	

2. Welches der drei oben aufgeführten Szenarien (A, B, C) würden Sie zur Erforschung Ihres Untersuchungszieles einsetzen? Bitte begründen Sie kurz Ihre Entscheidung.

1. A B C

2. A B C

Begründung:

Zu 1:

Zu 2:

Vielen Dank für die Teilnahme!

Fragebogen A & B

ID:
 Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

IAD

Hinweis:

Alle persönlichen Angaben werden nur im Rahmen der Befragung verwendet und werden nicht veröffentlicht. Die Daten werden anonymisiert erfasst. Bei der Auswertung werden wir nicht mehr auf Ihren Namen zurückgreifen. Wir garantieren Ihnen, dass Ihre persönlichen Angaben nicht an Dritte weitergegeben werden.

Abschnitt A: Allgemeine Angaben zur Person (vorher auszufüllen):																	
A1	Geburtsjahr: 19 ____																
A2	Geschlecht: weiblich <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/>																
A3	Wie viele Kilometer fahren Sie im Durchschnitt pro Jahr? 0 – 5.000 km <input type="checkbox"/> 20.000 – 30.000 km <input type="checkbox"/> 5.000 – 10.000 km <input type="checkbox"/> 30.000 – 40.000 km <input type="checkbox"/> 10.000 – 20.000 km <input type="checkbox"/> über 40.000 km <input type="checkbox"/>																
A4	Wie viele Jahre Fahrpraxis besitzen Sie? ca. ____ Jahre																
A5	Benötigen Sie eine Sehhilfe beim Fahren? Ja <input type="checkbox"/> , Dioptrin: ____ Nein <input type="checkbox"/>																
A6	Liegt bei Ihnen eine Rot/Grün-Schwäche vor? Ja <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/>																
A7	Welche Händigkeit liegt bei Ihnen vor? Rechtshänder <input type="checkbox"/> Linkshänder <input type="checkbox"/>																
A8	Welche Fzg. sind Sie bisher über einen längeren Zeitraum (mind. 6 Monate) gefahren? <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Marke</th> <th>Modell</th> <th>Leistung (PS)</th> <th>Baujahr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="4">Fzg. 1:</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Fzg. 2:</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Fzg. 3:</td> </tr> </tbody> </table>	Marke	Modell	Leistung (PS)	Baujahr	Fzg. 1:				Fzg. 2:				Fzg. 3:			
Marke	Modell	Leistung (PS)	Baujahr														
Fzg. 1:																	
Fzg. 2:																	
Fzg. 3:																	
A9	Als welchen Autofahrertyp sehen Sie sich? Unauffälliger Durchschnittsfahrer <input type="checkbox"/> Wenig routinierter-unentschlossener Fahrer <input type="checkbox"/> Sportlich-ambitionierter Fahrer <input type="checkbox"/> Risikofreudig-aggressiver Fahrer <input type="checkbox"/>																
A10	Wie gerne fahren Sie in der Regel Auto? Überhaupt nicht gerne <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Sehr gerne <input type="checkbox"/>																
A11	Wird Ihnen als Fahrer beim Autofahren schlecht? Nein, nie <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Ja, sehr oft <input type="checkbox"/>																


 ID:

 Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

IAD

Abschnitt B: Persönliche Erfahrungen (vorher auszufüllen):

B1	Nutzen Sie als Fahrer während der Autofahrt eines der folgenden Geräte privat oder beruflich?	<input type="checkbox"/> Mobiltelefon, mit Freisprecheinrichtung? _____ <input type="checkbox"/> Navigationssysteme (mobil oder on-board) <input type="checkbox"/> Notizblock <input type="checkbox"/> Fahrerassistenz-/Informationssysteme (z.B. Tempomat), genauere Angabe: _____ <input type="checkbox"/> Weitere: _____
B2	Spielen Sie privat gelegentlich Computerspiele?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, nutzen Sie dabei ein Spielelenkrad? <input type="checkbox"/> ja, immer <input type="checkbox"/> ja, gelegentlich <input type="checkbox"/> nein, nie
B3	Sind Sie schon einmal in einem Fahrsimulator gefahren?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, wie oft? <input type="checkbox"/> 1-2 mal <input type="checkbox"/> 3-5 mal <input type="checkbox"/> 5-10 mal <input type="checkbox"/> mehr als 10 mal
B4	Sind Sie schon einmal in einem anderen Simulator gefahren?	<input type="checkbox"/> ja, genauere Angaben: _____ <input type="checkbox"/> nein
B5	Wie aufgeregt sind Sie vor dieser Versuchsfahrt?	Nicht sehr aufgeregt Sehr aufgeregt <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
B6	Wie müde sind Sie gerade?	Nicht sehr müde Sehr müde <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Fragebogen C (mit Bewegung)

ID: Fahrtennung: Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

iad

Abschnitt C: Realitätsgrad des Fahrsimulators –mit Bewegung (hinterher auszufüllen):

Im folgenden Fragenabschnitt werden Ihnen Fragen zum Realitätsgrad des Fahrsimulators bzw. der Simulatorfahrt gestellt. Bitte wählen Sie bei jeder Frage eine der möglichen 6 Abstufungen aus und kennzeichnen Sie diese durch das Setzen eines Kreuzes.

Referenzzustand ist eine normale Autofahrt in Ihrem PKW auf öffentlicher Straße!

		Sehr gering				Sehr hoch	Mal gering, mal hoch
		1	2	3	4	5	
C1	Wie stufen Sie den Realitätsgrad der Simulatorfahrt ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Wenn durchweg sehr gering, weshalb?						
C2	Wie hoch war Ihre erforderliche Konzentration?						
	Insgesamt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Gerade Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Kurvige Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C3	Wie hoch war Ihr Sicherheitsempfinden als Fahrer während der Fahrt?						
	Insgesamt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Gerade Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Kurvige Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C4	Wie hoch war die Eintönigkeit der Fahrt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C5	Wie stark war das von Ihnen empfundene Übelkeitsgefühl während der Fahrt?	Keine Übelkeit	gering	mäßig	hoch	Sehr hoch	Mal gering, mal hoch
	Insgesamt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Gerade Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Kurvige Streckenabschnitte (z.B. Kreisell)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



ID: **Fahrerkennung:** Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

iaD

		Sehr gering					Sehr hoch	Mal gering, mal hoch
		1	2	3	4	5		
C6	Wie hoch empfanden Sie den Schwierigkeitsgrad, die <u>Fahrspur</u> zu halten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C7	Wie hoch empfanden Sie den Schwierigkeitsgrad, die gewünschte <u>Geschwindigkeit</u> zu fahren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C8	Wie hoch empfanden Sie den Schwierigkeitsgrad, die <u>Beschleunigung</u> des Simulators einzuschätzen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C9	Wie hoch empfanden Sie den Schwierigkeitsgrad, den <u>Abstand</u> zum vorwegfahrenden Fahrzeug einzuschätzen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C10	Wie hoch war die Realitätsnähe des <u>Bremsverhaltens</u> des Simulators?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C11	Wie hoch war die Realitätsnähe der <u>Verzugszeit</u> des Simulators vom Betätigen des Gaspedals bis zur wahrnehmbaren Beschleunigung?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C12	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der Genauigkeit des Fahrsimulators ein, in eine Kurve <u>ein-/auszulenken</u> ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C13	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad Ihrer <u>Kraftaufwendung bei Lenkbewegungen</u> des Simulators ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C14	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad Ihrer <u>Kraftaufwendung bei Pedalbewegungen</u> des Simulators ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	



ID: **Fahrtenummer:**
Technische Universität Darmstadt
Institut für Arbeitswissenschaft
Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

iad

		Sehr gering					Sehr hoch	Mal gering, mal hoch
		1	2	3	4	5		
C15	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der <u>Akustik von Fahrgeräuschen</u> ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C16	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der <u>Akustik von Umgebungsgeräuschen</u> ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C17	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der <u>Schilder- und Ampeldarstellung</u> ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C18	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der Entfernung ein, aus der Sie <u>Schilder während der Fahrt erkennen</u> konnten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wenn durchweg sehr gering, waren die Schilder früher oder später als bei einer Realfahrt oder zu spät zu erkennen? _____							
C19	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der <u>Größe der Projektionsfläche</u> ein, auf der die Umgebung dargestellt war?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wenn durchweg sehr gering, war die Sicht für die Fahraufgabe ausreichend? _____							
C20	Wie hoch war die Präzision der simulierten <u>Fahrbahnunebenheiten</u> ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C21	Als wie hoch stufen Sie die <u>Übereinstimmung von Bewegungssimulation und Sichtdarstellung</u> zueinander ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C22	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der <u>Bewegungssimulation</u> während der Fahrt ein?							
	Insgesamt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Gerade Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Kurvige Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	



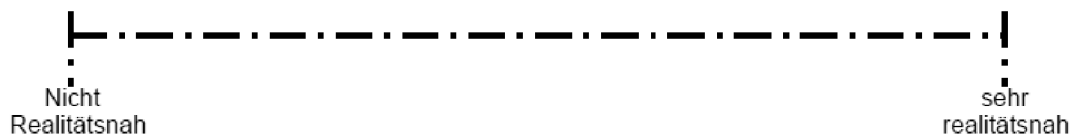
ID: Fahrtennummer: Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

IAD

C23

Bitte bewerten Sie jeden Aspekt der Simulation hinsichtlich seiner Realitätsnähe mit einem Kreuz und der dazugehörigen Ziffer (1-9) auf der Linie. Die Position des Kreuzes gibt Ihre Gesamtbewertung des jeweiligen Simulationselements wieder. Mit dem Abstand zwischen den Kreuzen können Sie erklären wie viel besser / schlechter der einzelne Aspekt im Vergleich zu den anderen ist.

1 Sichtsimation Frontansicht	5 Kraftaufwendung Pedalerie
2 Akustik eigene Fahrgeräusche	6 Optik des Fahrsimulators
3 Akustik Umgebungsgeräusche	7 Fahrdynamik des Fahrsimulators
4 Kraftaufwendung Lenkrad	8 Bewegungssimulation



C24

An welcher Stelle haben Sie Realitätsnähe vermisst?

Vielen Dank für die Teilnahme!

Fragebogen C (ohne Bewegung)

ID: Fahrtennummer: Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

iad

Abschnitt C: Realitätsgrad des Fahrsimulators –ohne Bewegung (hinterher auszufüllen):

Im folgenden Fragenabschnitt werden Ihnen Fragen zum Realitätsgrad des Fahrsimulators bzw. der Simulatorfahrt gestellt. Bitte wählen Sie bei jeder Frage eine der möglichen 6 Abstufungen aus und kennzeichnen Sie diese durch das Setzen eines Kreuzes.

Referenzzustand ist eine normale Autofahrt in Ihrem PKW auf öffentlicher Straße!

		Sehr gering				Sehr hoch	Mal gering, mal hoch
		1	2	3	4	5	
C1	Wie stufen Sie den Realitätsgrad der Simulatorfahrt ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Wenn durchweg sehr gering, weshalb?						
C2	Wie hoch war Ihre erforderliche Konzentration?						
	Insgesamt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Gerade Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Kurvige Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C3	Wie hoch war Ihr Sicherheitsempfinden als Fahrer während der Fahrt?						
	Insgesamt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Gerade Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Kurvige Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C4	Wie hoch war die Eintönigkeit der Fahrt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C5	Wie stark war das von Ihnen empfundene Übelkeitsgefühl während der Fahrt?	Keine Übelkeit	gering	mäßig	hoch	Sehr hoch	Mal gering, mal hoch
	Insgesamt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Gerade Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Kurvige Streckenabschnitte (z.B. Kreisel)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



ID: **Fahrerkennung:** Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

iad

		Sehr gering					Sehr hoch	Mal gering, mal hoch
		1	2	3	4	5		
C6	Wie hoch empfanden Sie den Schwierigkeitsgrad, die <u>Fahrspur</u> zu halten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C7	Wie hoch empfanden Sie den Schwierigkeitsgrad, die gewünschte <u>Geschwindigkeit</u> zu fahren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C8	Wie hoch empfanden Sie den Schwierigkeitsgrad, die <u>Beschleunigung</u> des Simulators einzuschätzen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C9	Wie hoch empfanden Sie den Schwierigkeitsgrad, den <u>Abstand</u> zum vorwegfahrenden Fahrzeug einzuschätzen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C10	Wie hoch war die Realitätsnähe des <u>Bremsverhaltens</u> des Simulators?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C11	Wie hoch war die Realitätsnähe der <u>Verzugszeit</u> des Simulators vom Betätigen des Gaspedals bis zur wahrnehmbaren Beschleunigung?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C12	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der Genauigkeit des Fahrsimulators ein, in eine Kurve <u>ein-/auszulenken</u> ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C13	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad Ihrer <u>Kraftaufwendung bei Lenkbewegungen</u> des Simulators ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C14	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad Ihrer <u>Kraftaufwendung bei Pedalbewegungen</u> des Simulators ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	



ID: Fahrtennummer: Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

iad

		Sehr gering					Sehr hoch	Mal gering, mal hoch
		1	2	3	4	5		
C15	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der <u>Akustik von Fahrgeräuschen</u> ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C16	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der <u>Akustik von Umgebungsgeräuschen</u> ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C17	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der <u>Schilder- und Ampeldarstellung</u> ein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
C18	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der Entfernung ein, aus der Sie <u>Schilder während der Fahrt erkennen</u> konnten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		Wenn durchweg sehr gering, waren die Schilder früher oder später als bei einer Realfahrt oder zu spät zu erkennen?						

C19	Wie hoch stufen Sie den Realitätsgrad der <u>Größe der Projektionsfläche</u> ein, auf der die Umgebung dargestellt war?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		Wenn durchweg sehr gering, war die Sicht für die Fahraufgabe ausreichend?						

	Insgesamt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Gerade Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Kurvige Streckenabschnitte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	



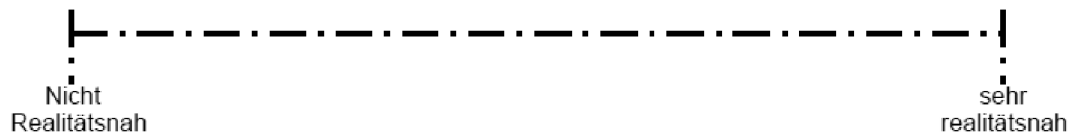
ID: Fahrtennung: Technische Universität Darmstadt
 Institut für Arbeitswissenschaft
 Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

iaD

C23

Bitte bewerten Sie jeden Aspekt der Simulation hinsichtlich seiner Realitätsnähe mit einem Kreuz und der dazugehörigen Ziffer (1-9) auf der Linie. Die Position des Kreuzes gibt Ihre Gesamtbewertung des jeweiligen Simulationselements wieder. Mit dem Abstand zwischen den Kreuzen können Sie erklären wie viel besser / schlechter der einzelne Aspekt im Vergleich zu den anderen ist.

1 Sichtsimation Frontansicht	5 Kraftaufwendung Pedalerie
2 Akustik eigene Fahrgeräusche	6 Optik des Fahrsimulators
3 Akustik Umgebungsgeräusche	7 Fahrdynamik des Fahrsimulators
4 Kraftaufwendung Lenkrad	



C24

An welcher Stelle haben Sie Realitätsnähe vermisst?

Vielen Dank für die Teilnahme!