



Matthias Wiedemann

Validierung der Fahrsimulation für das Erleben und Beurteilen fahrdynamischer Eigenschaften



Audi-Dissertationsreihe, Band 113





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Ergonomie

Validierung der Fahrsimulation für das Erleben und Beurteilen fahrdynamischer Eigenschaften

Dipl.-Ing. (Univ.) Matthias Ernst Wolfgang Wiedemann

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

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Hajek

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
2. Univ.-Prof. Dr. phil. Mark Vollrath

Die Dissertation wurde am 10.11.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 08.03.2016 angenommen.



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2016

Zugl.: (TU) München, Univ., Diss., 2016

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2016

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9297-9

eISBN 978-3-7369-8297-0

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Prozess- und Methodenentwicklung der Technischen Entwicklung der AUDI AG. Zum Gelingen der Arbeit haben viele Personen einen wertvollen Beitrag geleistet, für den ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Mein erster Dank gilt Professor Klaus Bengler für die Betreuung am Lehrstuhl für Ergonomie der TU München. Viele wertvolle Diskussionen bildeten die Grundlage der Arbeit und gaben hilfreiche Denkanstöße, Aspekte der industriellen Praxis aus wissenschaftlicher Sicht kritisch zu hinterfragen. Weiterhin danke ich Professor Manfred Hajek als Vorsitzendem der Prüfungskommission und Professor Mark Vollrath als Zweitprüfer für ihr Interesse an der Arbeit.

Seitens Audi gilt mein Dank zunächst Manfred Keul, der durch sein persönliches Interesse an Fragestellungen der virtuellen Entwicklung diese Doktorandenstelle ermöglicht hat.

Ganz besonders hervorheben möchte ich die Betreuung durch Dr.-Ing. Wolfram Remlinger. Mit viel Experimentierfreude und kreativen Ideen hat er ganz entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Dafür wie auch für viele persönliche Ratschläge herzlichen Dank!

Genauso wichtig waren die Hilfe und der Rat der weiteren Bürokollegen, Dr. Thomas Gruber, Dr. Sebastian Thiel und Dr.-Ing. Harald Wilhelm bei so manchen programmiertechnischen Herausforderungen oder fahrdynamischen Fragen. Vielen Dank aber auch für gute Tipps rund um die Promotion und die immer unterhaltsame Büroatmosphäre.

Für die Durchführung der Probandenstudien im Fahrzeug und Fahrsimulator war die Unterstützung vieler weiterer Personen wichtig. Insbesondere bedanken möchte ich mich bei Simon Ceh und Isis Mennig, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten die Datenerhebung zuverlässig begleitet haben. Für die technische Unterstützung geht mein Dank an die Kollegen der ASTech und dem Ars Electronica Futurelab. Auch den eigentlichen Hauptpersonen, den vielen interessierten und geduldigen Teilnehmern, besten Dank.

Für die Beratung in Bezug auf die statistische Auswertung der Versuchsdaten und die Wahl geeigneter Verfahren bedanke ich mich bei Dr. Stephan Haug von TUM|Stat.

Hilfreich und immer interessant waren der Austausch mit den Mitdoktoranden vom Lehrstuhl für Ergonomie und damit der Blick auf andere Promotionsprojekte. Vielen Dank im Besonderen an Alex Lange und Dr.-Ing. Thomas Müller für die unterhaltsame Diskussion vieler Fragestellungen, nicht nur zur Wahrnehmung von (Fahr-)dynamik!



Abschließend danke ich ganz besonders herzlich meiner Familie für ihre Unterstützung. Meine Eltern haben mich immer bestmöglich gefördert und so ganz wesentlich zum Erfolg der Arbeit beigetragen. Der größte Dank gilt meiner Partnerin Laura für die Geduld, die Motivation und das Teilen aller Höhen und Tiefen der Promotionsphase.

München, im April 2016

Matthias Wiedemann



Meinen Eltern





Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	XIII
Abstract	XV
Kapitel 1 Einführung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Begriffsdefinitionen	4
1.2.1 Erlebbarkeit	4
1.2.2 Fahrverhalten und Fahrerverhalten	4
1.2.3 Fahrdynamik	5
1.2.4 Validität	5
1.3 Gliederung der Arbeit	5
Kapitel 2 Grundlagen des Fahrerverhaltens im Fahrsimulator	7
2.1 Modelltheoretische Betrachtung der Fahrzeugführung	8
2.1.1 Strukturierung der Fahraufgabe	8
2.1.2 Modellzusammenhänge	10
2.1.3 Der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis	12
2.2 Der Mensch als Fahrzeugführer	13
2.2.1 Funktionsprinzip der menschlichen Wahrnehmung	13
2.2.2 Beschreibung relevanter Sinnesmodalitäten	14
2.2.3 Multimodale Wahrnehmung fahrdynamischer Größen	21
2.3 Fahrsimulation zur Abbildung von Fahrverhalten	25
2.3.1 Thematischer Überblick	25
2.3.2 Validität von Simulatorversuchen	26
2.3.3 Klassifikation von Fahrsimulatoren	28
2.3.4 Stand der Technik	29



2.4	Bewertung von Fahrverhalten	38
2.4.1	Verfahren zur objektiven Beurteilung von Fahrverhalten	39
2.4.2	Verfahren zur subjektiven Beurteilung von Fahrverhalten	39
2.4.3	Objektivierungsverfahren	40
Kapitel 3	Forschungsansatz und Vorgehensweise	43
3.1	Spezifizierung des Forschungsansatzes	43
3.1.1	Fokussierung auf Fahrdynamik in Fahrsimulatoren	44
3.1.2	Fahrerverhalten und Beurteilungsqualität als Validierungsbasis	45
3.1.3	Ableitung übergreifender Fragestellungen	46
3.2	Präzisierung des Forschungsansatzes	47
3.2.1	Definition der Nutzergruppe	47
3.2.2	Aufgabenspektrum Fahrdynamikeigenschaften	49
3.2.3	Bewertung anhand der Informationsumsetzung	49
3.2.4	Eingesetzte Simulatortechnologie	49
3.3	Experimentelle Umsetzung der Fragestellungen in Probandenstudien	50
3.3.1	Probandenstudien im Realfahrzeug	50
3.3.2	Probandenstudien im Fahrsimulator	51
3.3.3	Machbarkeitsstudie zum Einsatz neuer Simulationstechnologie	51
3.4	Kennwerte der Fahr- und Beurteilungsaufgaben	52
3.4.1	Kennwerte zur Beschreibung der Beurteilungsqualität	52
3.4.2	Kennwerte zur Beschreibung des Fahrerverhaltens	52
3.4.3	Inferenzstatistische Auswertungsverfahren	55
Kapitel 4	Probandenstudien im Realfahrzeug	59
4.1	Zielsetzung und Versuchsdesign	60
4.1.1	Versuchsreihe Längsdynamik	60
4.1.2	Versuchsreihe Querdynamik	62
4.1.3	Versuchsreihe Vertikaldynamik	64
4.1.4	Datenerhebung und statistische Bewertung der Versuchsfaktoren	66



4.2	Realisierung des Versuchsdesigns	67
4.2.1	Darstellung der Versuchsfaktoren im Realfahrzeug	67
4.2.2	Versuchsablauf	68
4.2.3	Gestaltung der Fahr- und Beurteilungsaufgaben	68
4.2.4	Stichprobenbeschreibung	70
4.3	Ergebnisse	71
4.3.1	Ergebnisse Längsdynamik	71
4.3.2	Ergebnisse Querdynamik	72
4.3.3	Ergebnisse Vertikaldynamik	86
4.4	Diskussion	89
4.4.1	Subjektive Daten der Beurteilungsqualität	89
4.4.2	Objektive Daten des Fahrerverhaltens	91
4.4.3	Diskussion des Versuchsdesigns	93
4.4.4	Folgerungen für die Gestaltung von Fahrsimulatoren	94
Kapitel 5	Probandenstudien im Fahrsimulator	97
5.1	Zielsetzung und Versuchsdesign	97
5.1.1	Versuchsreihe Längsdynamik	98
5.1.2	Versuchsreihe Querdynamik	100
5.1.3	Versuchsreihe Vertikaldynamik	102
5.1.4	Datenerhebung und statistische Bewertung der Versuchsfaktoren	104
5.2	Realisierung des Versuchsdesigns	105
5.2.1	Aufbau des Fahrsimulators	105
5.2.2	Versuchsablauf	105
5.2.3	Gestaltung der Fahr- und Beurteilungsaufgaben	106
5.2.4	Stichprobenbeschreibung	107
5.3	Ergebnisse	109
5.3.1	Ergebnisse Längsdynamik	109
5.3.2	Ergebnisse Querdynamik	110



5.3.3	Ergebnisse Vertikaldynamik	117
5.4	Diskussion	120
5.4.1	Subjektive Daten der Beurteilungsqualität	120
5.4.2	Objektive Daten des Fahrerverhaltens	123
5.4.3	Ergebnisbewertung und Vergleich mit Realfahrzeugstudien	125
5.4.4	Diskussion des Versuchsdesigns	128
Kapitel 6	Probandenstudien zu Fahrsimulatortechnologie	129
6.1	Galvanische Vestibuläre Stimulation	129
6.1.1	Funktionsweise und Stand der Forschung	130
6.1.2	Einsatz in virtuellen Umgebungen	131
6.2	Zielsetzung und Versuchsdesign	132
6.2.1	Parameterermittlung und Verträglichkeitstest	132
6.2.2	Test der Beschleunigungswahrnehmung	133
6.2.3	Versuchsreihe Querdynamik mit GVS-System	134
6.3	Realisierung des Versuchsdesigns	136
6.3.1	Aufbau des GVS-Systems	136
6.3.2	Ermittlung der Grenzwerte der Stromstärke	137
6.3.3	Parametrierung des GVS-Systems	137
6.3.4	Stichprobenbeschreibung	138
6.4	Ergebnisse	139
6.4.1	Parametrierung und Verträglichkeit	139
6.4.2	Subjektive Daten zur Beschleunigungswahrnehmung	140
6.4.3	Subjektive Daten der Beurteilungsqualität	141
6.4.4	Objektive Daten des Fahrerverhaltens	142
6.5	Diskussion	148
6.5.1	Parametrierung, Verträglichkeit und Beschleunigungswahrnehmung	148
6.5.2	Subjektive Bewertung	149
6.5.3	Objektives Fahrerverhalten	150



Kapitel 7 Zusammenfassende Diskussion und Ausblick	153
7.1 Zusammenfassung der Probandenstudien	153
7.2 Aussagekraft der Beurteilungsqualität und des Fahrerverhaltens	155
7.3 Ausblick	157
Literaturverzeichnis	159
Abbildungsverzeichnis	173
Tabellenverzeichnis	181
Anhang	183
Anhang A Übersicht der objektiven Versuchsdaten	183
A.1 Probandenstudien im Realfahrzeug (Kapitel 4)	183
A.2 Probandenstudien im Fahrsimulator (Kapitel 5)	185
A.3 Probandenstudien zu Fahrsimulatortechnologie (Kapitel 6)	186
Anhang B Erfassung subjektiver Daten	188
B.1 Übergreifend eingesetzte Fragebögen	188
B.2 Fragebögen der GVS-Studie	189
Anhang C Versuchsstrecken	191
C.1 Teststrecke Querdynamik	191
C.2 Teststrecke Vertikaldynamik	191



Kurzfassung

Ausgangssituation

Im Entwicklungsprozess der Fahrzeugindustrie werden verstärkt virtuelle Konstruktions- und Berechnungsmethoden eingesetzt. Hintergrund ist die Zeit- und Kostenproblematik, die der Aufbau und die Erprobung realer Prototypen- und Versuchsfahrzeuge mit sich bringen. Bei der Fahrdynamikentwicklung zählen computerbasierte Verfahren zur Ermittlung objektiver Daten zum Stand der Technik und substituieren damit reale Messungen. Methodischer Handlungsbedarf besteht hinsichtlich geeigneter Simulationsverfahren, die ein subjektives Erleben des Entwicklungsstandes in einer virtuellen Umgebung ermöglichen.

Zielsetzung und Methodik

Die Dissertation prüft das Potential der Fahrsimulation für den Bereich der Fahrdynamik. Zielsetzung ist es, eine valide Erlebbarkeit fahrdynamischer Eigenschaften im Simulator nachzuweisen und somit eine methodische Durchgängigkeit der virtuellen Entwicklung aufzuzeigen. Fokussiert werden grundlegende fahrdynamische Fragestellungen im frühen Stadium des Entwicklungsprozesses. Im Rahmen von Probandenstudien erfolgt die Analyse entsprechender Fahr- und Beurteilungsaufgaben. Die Validierung wird nutzerzentriert mittels der Überprüfung des Fahrerverhaltens auf Bahnführungs- und Stabilisierungsebene bzw. der Ermittlung der Beurteilungsqualität vorgenommen. Das zugehörige Probandenkollektiv besteht aus technisch versierten Normalfahrern, die den Kreis der Entscheidungsträger in Automobilunternehmen repräsentieren.

Probandenstudien und Ergebnisse

In Versuchsreihen im Realfahrzeug wird anhand exemplarischer Aufgaben der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik die Bedeutung der visuellen und akustischen Wahrnehmung ermittelt. Die Einschränkung des Hörvermögens führt dabei zu erhöhten Fahrgeschwindigkeiten, die in Folge eine erhöhte Lenkregelaktivität bedingen. Sichteinschränkungen werden vornehmlich durch eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit kompensiert. Die Differenzierungsfähigkeit für Fahrzeugeigenschaften wie auch die Sicherheit in der Beurteilung bleiben quantitativ unverändert, qualitativ kann eine Einschränkung abgeleitet werden.

Studien im Fahrsimulator vergleichen ein dynamisches Simulationssystem mit Bewegungsplattform mit einer rein statischen Simulatorvariante und ermöglichen damit, den Einfluss vestibulärer Reize zu analysieren. Der Abgleich mit den Daten der Realfahrzeugstudien legt nahe, dass beide Varianten des Simulators auf Bahnführungsebene, mit Ausnahme des Bremsverhaltens, valides Fahrerverhalten ermöglichen. Einem Einsatz bei Fragestellungen auf Stabilisierungs-

KURZFASSUNG

ebene stehen dagegen unrealistische Kennwerte des Lenkregelverhaltens mit gesteigerter Frequenz und vergrößerten Amplituden entgegen. Bauartbedingt erscheint die dynamische Variante des getesteten Simulators mit Bewegungsplattform als besonders ungünstig. Ein Zusammenhang zwischen der Beurteilungsqualität bei der Bewertung von Fahrzeugeigenschaften und zusätzlichen vestibulären Informationen der Bewegungsplattform kann nicht ermittelt werden. Die Reliabilität der Simulatorversuche wird überwiegend bestätigt.

Zur Verbesserung des Lenkregelverhaltens wird in einer weiteren Fahrsimulatorstudie der Einsatz von Galvanischer Vestibulärer Stimulation, einer Technologie zur Beeinflussung des menschlichen Gleichgewichtssinns, geprüft. Bei ansonsten unveränderten Ergebnissen bietet diese Technologie das Potential für realitätsnäheres Lenkverhalten auf Stabilisierungsebene.

Abstract

Current situation

In the automotive development process the use of virtual design and calculation methods is increasing. Main reasons are time and cost issues for construction and testing of real prototype and test vehicles. In the development of driving dynamics computer-based methods for determining objective data are state of the art and thereby substitute real measurements. Appropriate simulation methods need improvement to allow for a subjective experience of the current project status in a virtual environment.

Objectives and Methods

The thesis evaluates the potential of driving simulation in the field of driving dynamics. The objective is to demonstrate a valid experience of driving dynamics characteristics in the simulator and thus demonstrate a continuous workflow within the virtual development process. Hereby the focus is on basic questions concerning driving dynamics at an early stage of the development process. Experimental series are conducted to analyze corresponding driving and assessment tasks. The validation focuses on the user via the evaluation of driver's behavior on guidance and stabilization level and the determination of the quality of assessments. The participating subjects are technical versed, non-expert drivers who represent the circle of decision-makers in automotive companies.

Experiments and Results

Experiments in the real vehicle identify the influence of visual and auditory perception on basis of exemplary tasks of longitudinal, lateral and vertical driving dynamics. The hearing impairment leads to a raise of driving speed, causing an increase in steering activity. View restrictions are mainly compensated by a reduction of driving speed. The ability to differentiate between specific settings of vehicle characteristics as well as confidence in the assessment remain quantitatively unchanged. However, restrictions can be inferred in terms of quality.

Experiments in the driving simulator compare a dynamic simulation system with a motion platform to a static simulator variant and thus allow analyzing the influence of vestibular stimuli. The comparison with the data of the real vehicle experiments suggests that, with the exception of braking, both versions of the simulator enable valid driver behavior on guidance level. However, unrealistic steering behavior with increased frequencies and increased amplitudes preclude the use for issues on stabilization level. Due to its design the dynamic version of this simulator with a motion platform appears to be particularly unfavorable. A connection between the

ABSTRACT

assessment quality in the evaluation of vehicle characteristics and additional vestibular information on the motion platform cannot be established. Reliability of the simulator experiments can be achieved in most cases.

To improve the steering behavior, the use of Galvanic Vestibular Stimulation, a technology for influencing the human vestibular system, is tested in another driving simulator experiment. With other results remaining unchanged, this technology bears the potential for more realistic steering behavior on stabilization level.



*Eben habe ich zwar ein gutes Auto entwickelt,
aber es ist schlecht genug, um es trotzdem
wieder verbessern zu können.*

August Horch

Kapitel 1

Einführung

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Produkte und Integration zusätzlicher Innovationen in das Fahrzeug war von Beginn an Ziel in der Automobilindustrie. Mit zunehmender Erfüllung des grundlegenden Mobilitätsgedankens bestimmen Vernetzung und Individualisierung des Fahrzeugs die aktuellen Entwicklungsziele. Die Internationalisierung erfordert zusätzlich eine verstärkte Berücksichtigung heterogener Kundenanforderungen in unterschiedlichen Fahrzeugmärkten (Ebel, Hofer & Genster, 2014). Die derzeitige Antwort aus Sicht der Hersteller ist eine stetige Erweiterung des Modellangebots bei gleichzeitig deutlich vergrößertem Funktionsumfang. Die dadurch steigende Komplexität der Produkte erfordert auch die Weiterentwicklung der zugehörigen Entwicklungsmethoden und -prozesse.

1.1 Motivation

Vor der breiten Verfügbarkeit von Hochleistungs-Computersystemen war eine rein fahrzeugbasierte Entwicklung in Form von Mess- und Testfahrten mittels realer Fahrzeuge der gängige Standard. Aus heutiger Sicht gestaltet sich dieser Prozess, neben dem finanziellen Aspekt beim Aufbau und der Erprobung von Prototypen- und Versuchsfahrzeugen, vor allem als zu zeitintensiv, um die weiter steigende Zahl an Modellen vollständig abdecken zu können. Eine etablierte Strategie ist es deshalb, den Einsatz virtueller Methoden zu forcieren und bei validen Ergebnissen den Realversuch zu ersetzen (Widmann & Hackenberg, 2013).

Der Begriff des Computer-Aided-Engineering (CAE) umschreibt computerbasierte Verfahren, die auf Basis virtueller Modelle die Möglichkeit bieten, Aussagen zu den Eigenschaften eines Fahrzeugs zu treffen. Ihr Einsatz beginnt bereits in der Konzeptphase, dem ersten Abschnitt des Produktentstehungsprozesses. Nach Widmann (2013) zählt dazu, abgesehen von wenigen Ausnahmen wie beispielsweise der Aeroakustik, bereits ein Großteil der Umfänge der Fahrzeugentwicklung. Weiterhin bieten diese Verfahren in der nachgelagerten Serienentwicklungsphase die Chance, Realversuche zu substituieren oder deren Anzahl zu minimieren.

Auch zur Entwicklung des Fahrverhaltens eines Fahrzeugs sind heute bereits ab der Konzeptphase valide Berechnungsmethoden verfügbar, um die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs abzusichern. Zu Beginn der Serienentwicklungsphase werden, sobald erste Versuchsfahrzeuge verfügbar sind, parallel Messungen und Versuche am Realfahrzeug durchgeführt. Zum Ende des Entwicklungsprozesses wird die Feinabstimmung fast ausschließlich am Realfahrzeug vorgenommen.

Für die Bewertung der fahrdynamischen Eigenschaften werden während der Entwicklung auch subjektive Kennwerte herangezogen. Wie in Kapitel 3 weiter ausgeführt wird, ist das vom Kunden erlebbare Fahrverhalten bestimmend für den Charakter einer Marke und wird deshalb je nach Hersteller auch anhand subjektiver Kriterien verschieden ausgelegt. Zum anderen interagiert der Mensch als Fahrer in mehreren Regelkreisläufen mit dem Fahrzeug, im Detail in Kapitel 2 beschrieben. Da hier individuelle Fähigkeiten und Verhaltensweisen zu berücksichtigen sind, ist während des Abstimmprozesses ein menschliches Subjektivurteil zur Beherrschbarkeit des Fahrzeugs durch erfahrene Entwickler unverzichtbar. Bislang liegt der Vorteil des physischen Entwicklungsprozesses in der Durchgängigkeit von objektiver Messung zu subjektiver Erprobung am realen Fahrzeug. Die virtuelle Entwicklung im Bereich der Fahrdynamik hingegen bietet nur die Möglichkeit der Ermittlung objektiver Kenngrößen.

Um aber eine Reduzierung des physischen Erprobungsbedarfs realisieren zu können, werden virtuelle Methoden benötigt, die auch ein subjektiv geprägtes Erleben von Fahrdynamik ermöglichen.

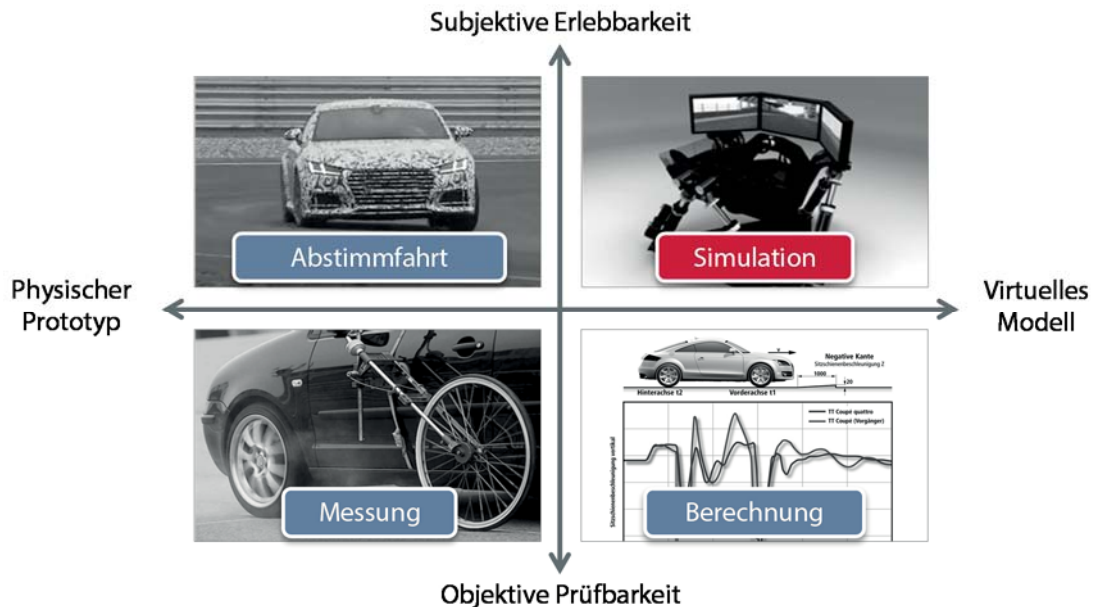


Abbildung 1-1: Erlebbarkeit und Prüfbarkeit in der virtuellen und realfahrzeugbasierten Fahrdynamikentwicklung

Wie in Abbildung 1-1 schematisch dargestellt, bietet Fahrsimulation die geforderte Kombination aus virtueller und zugleich subjektiv geprägter Entwicklungsmöglichkeit¹. Für Fahrzeugeigenschaften aus dem Bereich der Innenraumentwicklung oder der Fahrerassistenzsysteme wird diese Methode erfolgreich angewandt.

Im Bereich der Fahrdynamik ist der Nachweis zu erbringen, dass ein entsprechend gestalteter Fahrsimulator als virtuelles Pendant zum Versuchsfahrzeug ebenfalls das Potential bietet, das Erleben dieser Gruppe von Fahrzeugeigenschaften zu gewährleisten. Zwei Aspekte sind dabei als wesentliche Vorteile zu betrachten. Zum einen kann eine Steigerung der Entwicklungsqualität erreicht werden. Dies liegt darin begründet, dass virtuelle Techniken wie die Fahrsimulation noch vor der Verfügbarkeit erster Versuchsfahrzeuge zu einem früheren Zeitpunkt im Prozess die Möglichkeit für Subjektivurteile bieten.

¹ Im Kontext dieser Arbeit wird bei der Darstellung einer virtuellen Umgebung von *Simulation* gesprochen. Computergestützte Berechnungsverfahren, für welche dieser Begriff ebenfalls geläufig ist, werden zur Unterscheidung bewusst als *Berechnung* bezeichnet.

Zum anderen bietet sich die Chance zur Reduktion von Versuchsfahrzeugen. Je nach Reifegrad bzw. Stadium im Entwicklungsprozess werden Realfahrzeuge zur Feinabstimmung fahrdynamischer Eigenschaften auch weiterhin zum Einsatz kommen. Durch die virtuelle Bearbeitung grundlegender Fragestellungen im Fahrsimulator kann aber auch für das Themengebiet der Fahrdynamik der Bedarf an ersten, besonders kostenintensiven Versuchsfahrzeugen gesenkt werden.

1.2 Begriffsdefinitionen

Zu Beginn erfolgt eine im fachlichen Kontext der Arbeit gültige Definition und Abgrenzung wesentlicher Terminologien. Dies sind die Begriffe Erlebbarkeit und Validität sowie Fahrverhalten, Fahrerverhalten und Fahrdynamik.

1.2.1 Erlebbarkeit

Erlebbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit als Eigenschaft einer Versuchsumgebung definiert, einen Sachverhalt „anschaulich“, also mit den menschlichen Sinnessystemen erfassbar, darzustellen.

Im Bereich virtueller Methoden wird ein hoher Grad der Erlebbarkeit durch eine ausreichend hohe Qualität bzw. Realitätsnähe der mittels der Simulationsumgebung erzeugten Sinneseindrücke erreicht.

Ergebnis eines erlebbar gestalteten Simulationssystems sind zwei Aspekte:

- Der Nutzer zeigt in der virtuellen Umgebung ein Verhalten, das auf das Verhalten in der realen Umgebung übertragbar ist.
- Der Nutzer wird befähigt, simulierte Eigenschaften und Funktionen in vergleichbarer Weise zu erfassen und zu bewerten, wie dies in einer realen Umgebung der Fall ist.

1.2.2 Fahrverhalten und Fahrerverhalten

„Als Fahrverhalten bezeichnet man allgemein die Reaktion des Fahrzeugs auf Fahrereingaben und auf Störungen wie beispielsweise Seitenwind oder Straßenunebenheiten“ (Pfeffer & Harrer, 2011, S. 125). Demnach bezieht sich der Begriff des Fahrverhaltens rein auf technische und physikalische Werte, die das Fahrzeug betreffen. Größen, die den Fahrer selbst bzw. seine Verhaltensweisen in Form von Regeleingriffen während der Fahraufgabe charakterisieren, werden unter dem Begriff des Fahrerverhaltens zusammengefasst.

1.2.3 Fahrdynamik

„Die Fahrdynamik beschreibt alle Bewegungen des Fahrzeugs, d. h. die Wege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen sowie die auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte und Momente“ (Heißing, Ersoy & Gies, 2013a, S. 38). Dabei werden nach den translatorischen Hauptbewegungsrichtungen des Fahrzeugaufbaus die Bereiche Längs-, Quer- und Vertikaldynamik unterschieden (Heißing et al., 2013a). Der Zusammenhang zum Begriff des Fahrverhaltens kann wie folgt definiert werden: „Fahrdynamik ist die analytische und experimentelle Beschreibung, Analyse, Optimierung und Bewertung des Fahrverhaltens vorwiegend mittels systemdynamischer und regelungstechnischer Methoden“ (Schindler, 2007, S. 7).

1.2.4 Validität

„Validität oder Gültigkeit eines Tests oder eines Meßverfahrens ist seine inhaltliche Meßgenauigkeit in Bezug auf ein bestimmtes Kriterium. Sie gibt an, ob und in welchem Maße ein Testverfahren mißt, was es messen soll“ (Koschnick, 1995, S. 641).

Nach Harting, Frey und Jude (2012) ist Validität das wesentliche Gütekriterium, da ohne die Gültigkeit eines Tests und seiner Interpretation die Überprüfung von Objektivität und Reliabilität belanglos ist. Eine weiterführende Diskussion des Validitätsbegriffs im thematischen Zusammenhang der Fahrsimulation findet sich in Kapitel 2.3.2.

1.3 Gliederung der Arbeit

Nach der Motivation der Arbeit in diesem ersten Kapitel werden in Kapitel 2 die zum Verständnis des Themengebiets notwendigen Grundlagen aufbereitet. Dabei erfolgt auch die Analyse des Forschungsumfelds und des Stands der Technik.

In Kapitel 3 wird basierend auf den beschriebenen Handlungsfeldern der Forschungsansatz entwickelt. Dazu werden die Annahmen dieser Arbeit spezifiziert, eine Abgrenzung zu vergleichbaren Ansätzen gezogen und die zentralen Thesen formuliert.

Kapitel 4, Kapitel 5 und Kapitel 6 bearbeiten in Form von Probandenstudien die zuvor definierten Fragestellungen. Es erfolgt jeweils eine Beschreibung der Zielsetzung, des Versuchsdesigns und der Ergebnisse wie auch die zugehörige Diskussion.

Die übergreifende Diskussion wird in Kapitel 7 geführt, der abschließende Ausblick definiert weitere Handlungsfelder.



Kapitel 2

Grundlagen des Fahrerverhaltens im Fahrsimulator

Das zweite Kapitel führt in die Thematik der Arbeit ein. Das Vorgehen dazu orientiert sich an Abbildung 2-1. Zunächst werden in Kapitel 2.1 die regelungstechnischen Modellvorstellungen zur Interaktion von Mensch und Maschine eingeführt und der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis abgeleitet. Darauf aufbauend beschäftigt sich Kapitel 2.2 mit dem Menschen als zentrales Element des Regelkreises. Insbesondere wird die menschliche Wahrnehmung hinsichtlich fahrdynamischer Größen analysiert. Kapitel 2.3 geht auf die Abbildung des zweiten wesentlichen Elements der Regelstrecke, das Fahrzeug in Form eines Fahrsimulators, ein. Verschiedene Forschungsansätze und der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Fahrdynamikdarstellung werden beschrieben.

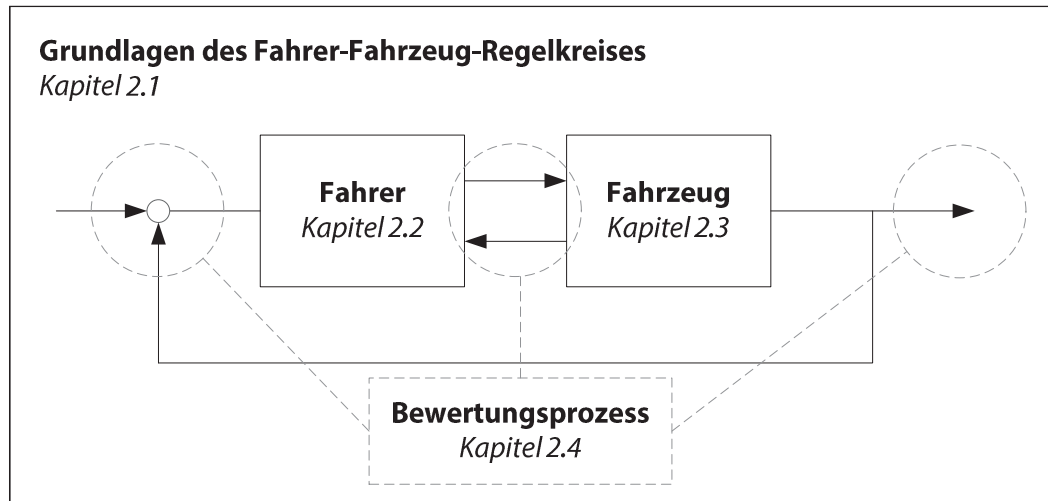


Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau von Kapitel 2 anhand des Mensch-Maschine-Regelkreises nach Bernotat (1970) bzw. Bubb (1993)

Abschließend zeigt Kapitel 2.4 Möglichkeiten der subjektiven und objektiven Bewertung von Fahrdynamikeigenschaften. Wie in Abbildung 2-1 angedeutet, werden dazu Ein- und Ausgangsgrößen des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises verglichen, der Bewertungsprozess setzt aber auch direkt an den Schnittstellen zwischen Fahrer und Fahrzeug an.

2.1 Modelltheoretische Betrachtung der Fahrzeugführung

Das Zusammenspiel des Fahrers mit seinem Fahrzeug bildet ein komplexes System aus hierarchischen Regelkreisläufen (Bubb, 1993). Die Strukturierung der Fahraufgabe in verschiedene Ebenen wird zunächst beschrieben, anschließend der Zusammenhang zu anderen Modellen hergestellt. Abschließend wird auf die Schnittstellen zwischen Fahrer und Fahrzeug eingegangen.

2.1.1 Strukturierung der Fahraufgabe

Zunächst lassen sich die unterschiedlichen Tätigkeiten des Fahrers während der Fahraufgabe in drei grundlegende Ebenen unterteilen (Bubb, 2002; Geiser, 1985). Dabei sind folgende Vorgänge charakteristisch (Bubb, 2001, 2002):

- **Primäre Fahraufgabe:** Diese bezeichnet den eigentlichen Vorgang der Fahrzeugführung, d. h. alle steuernden und regelnden Tätigkeiten des Fahrers, die unmittelbar der Erfüllung der Transportaufgabe dienen. Als wesentliche Bedienelemente sind hier die Lenkung, Schaltung und Pedalerie zu nennen.



- **Sekundäre Fahraufgabe:** Darunter fallen Aufgaben, die durch die Einbindung des Fahrers in das Verkehrsgeschehen oder durch Umwelteinflüsse notwendig sind, aber keinen elementaren Bestandteil der Fahraufgabe bilden. Als typisches Beispiel kann die Betätigung von Lenkstockhebeln wie Fahrtrichtungsanzeiger oder der Wischerhebel angeführt werden.
- **Tertiäre Fahraufgabe:** Hierunter sind Vorgänge im Fahrzeug zu verstehen, die der Befriedigung von Informations- und Komfortbedürfnissen des Fahrers entsprechen. Dazu zählt die Bedienung von Klima- oder Mediensystemen.

Die primäre Fahraufgabe bietet wiederum die Möglichkeit der Gliederung in regelungstechnische Submodelle. Diese Form der Abbildung der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt findet sich bereits bei Bernotat (1970). Hier wird eine Unterteilung der Aufgaben des Piloten in die drei Ebenen Navigation, Lenkung und Flugregelung vorgenommen, mit der wesentlichen Erkenntnis, dass der Mensch als adaptiver Regler in den Kreisläufen zu sehen ist. Abbildung 2-2 zeigt den einfachsten Fall eines Regelkreises mit der Aufgabenstellung als Führungs- und der Aufgabenerfüllung als Nachführgröße.

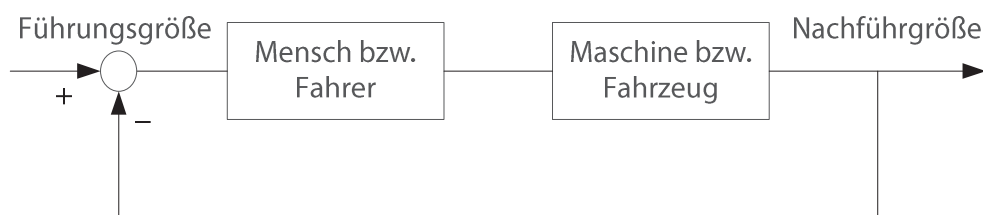


Abbildung 2-2: Der Regelkreis von Fahrer und Fahrzeug nach Bubb (1993) bzw. Bernotat (1970)

Speziell für das Lenkregelverhalten im Fahrzeug präzisiert das Zwei-Ebenen-Modell von Donges (1978) das Verhalten des Menschen im Regelkreis. Zum einen ermöglicht die Vorausschau des Fahrzeugführers eine antizipatorische Steuerung, zum anderen werden Abweichungen von diesem geplanten Sollkurs mittels einer kompensatorischen Regelung ausgeglichen. Für die Fahraufgabe im Straßenverkehr bezeichnet Donges (1982) die zugehörigen Ebenen als Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene. Folgende Prozesse sind dabei den jeweiligen Ebenen zugeordnet (Braess & Donges, 2006; Donges, 1982, 2012):

- **Navigationsebene:** Hier erfolgt die übergeordnete Planung des zeitlichen und räumlichen Rahmens der Fahrt. Diese Aufgabe wird vom Fahrer örtlich, punktuell und zeitlich diskret durchgeführt. Der zeitliche Horizont erstreckt sich dabei von mehreren Stunden bis in den Minutenbereich.



- **Bahnführungsebene:** Die eigentliche Ausübung der Fahrtätigkeit geschieht in diesem kontinuierlichen Prozess. Dabei wird die Sollspur und Sollgeschwindigkeit als Führungsgröße des Regelkreises festgelegt.
- **Stabilisierungsebene:** Abweichungen der aktuellen räumlichen Position von der Führungsgröße werden durch die angesprochene Regelung kompensiert. Dabei handelt es sich um längs- oder querdynamische Korrekturen im Sekundenbereich.

Die zeitlichen Zusammenhänge werden in Abbildung 2-3 nach Braess und Donges (2006) verdeutlicht. Ausgangspunkt der Grafik ist eine potentiell kritische Verkehrssituation, die in der Quer- oder Längsregelung des Fahrzeugs einen stabilisierenden Fahrereingriff fordert.

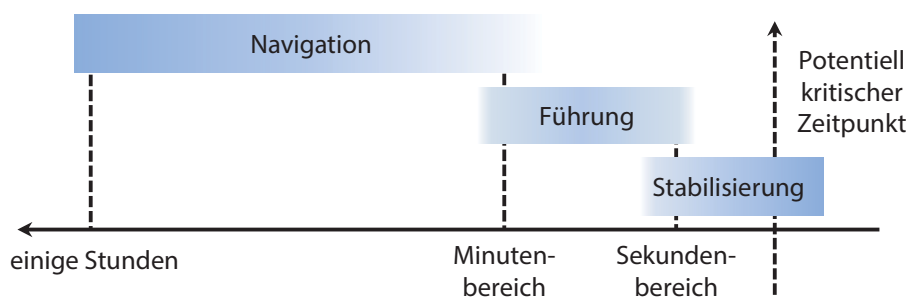


Abbildung 2-3: Zeitverlauf der Ebenen der primären Fahraufgabe nach Braess und Donges (2006)

2.1.2 Modellzusammenhänge

Eine umfassende Analyse verschiedener weiterer Modellvorstellungen erfolgt durch Michon (1985). Hier wird gefordert, dass ein allgemeingültiges Modell eine Aufwärts- wie auch Abwärtsstrukturierung kognitiver Prozesse unterstützt und offen für die Einbindung neuer kognitiver Modelle sein muss.

Ein Beispiel einer oftmals dargestellten Verbindung findet sich im Modell der menschlichen Handlungsregulation von Rasmussen (1983) zur Bedienung technischer Systeme. Ohne direkten Bezug zum Fahrzeugkontext werden die drei hierarchischen, hier aufsteigend genannten Ebenen, als fertigkeitbasiertes (skill-based), regelbasiertes (rule-based) und wissensbasiertes (knowledge-based) Handeln definiert.

In der fertigkeitbasierten Ebene wird durch eine Information direkt die erlernte Aktion ausgelöst. Für weniger automatisierte Prozesse existieren auf der nächst höheren Ebene Handlungsregeln, die nach Prüfung der Information Anwendung finden. Erst wenn keine Regel existiert, muss auf Basis von Wissen eine problemlösende Strategie entwickelt werden. (vgl. Hofinger, 2012)



Bei Donges (2012) wird dieses Modell der Handlungsregulation mit den drei Ebenen der primären Fahraufgabe in Zusammenhang gebracht. Abbildung 2-4 zeigt die Anknüpfungspunkte der jeweiligen Ebenen.

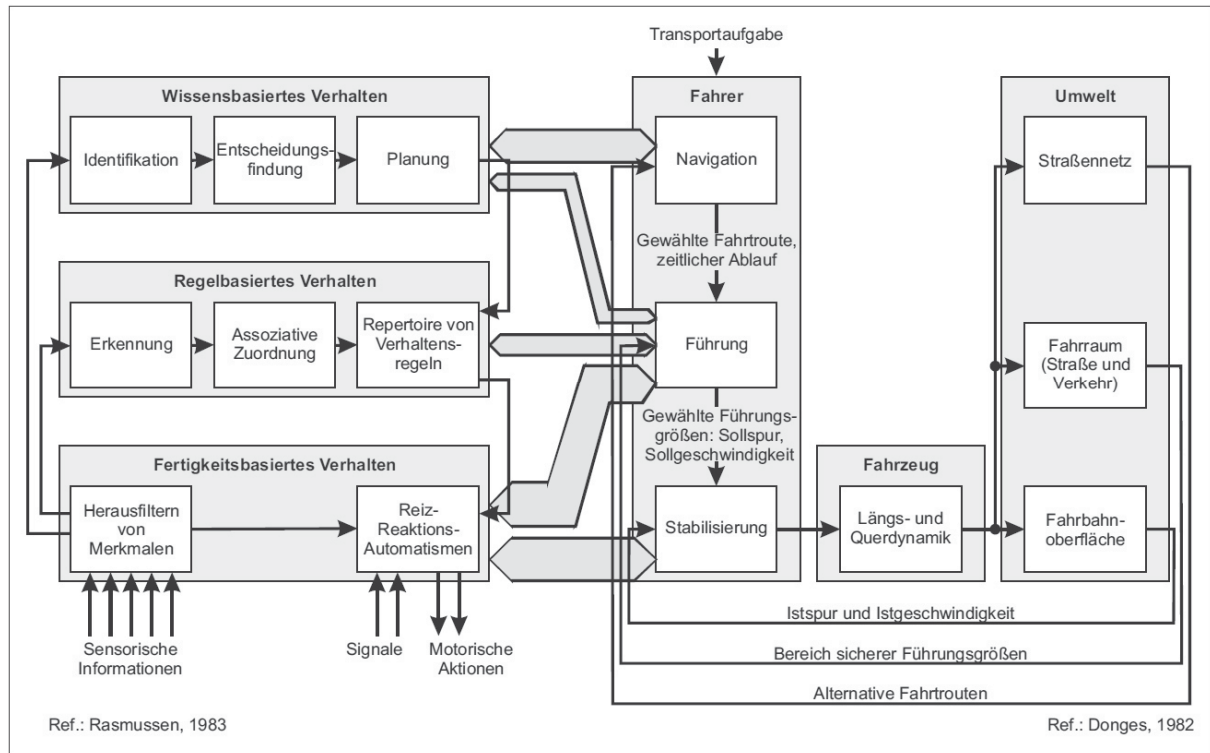


Abbildung 2-4: Verknüpfung des Modells der Handlungsregulation mit dem Drei-Ebenen-Modell der primären Fahraufgabe (Donges, 2012)

In einer fremden Verkehrsumgebung wird auf Navigationsebene wissensbasiertes Handeln ausgeführt. Ist dagegen die Fahrtstrecke bekannt, beschränken sich die Tätigkeiten des Fahrers überwiegend auf die Bahnführungs- und Stabilisierungsebene. Sofern der Fahrer ausreichende Expertise besitzt, werden zur Bahnführung großteils trainierte Fertigkeiten sowie eingübte Regeln benötigt. Andernfalls, beispielsweise bei Fahranfängern, werden auch wissensbasierte Prozesse aktiviert. Der Bereich der Stabilisierung wird ausschließlich von fertigkeitsbasiertem Verhalten bestimmt. (vgl. Donges, 2012)

Dies ist vor allem durch die geringe Zeitdauer, die in dieser Ebene zur Verfügung steht, begründet, wodurch auch keine länger andauernden kognitiven Prozesse möglich sind (Rasmussen, 1983).

2.1.3 Der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis

Basierend auf den zuvor genannten Modellen soll noch einmal der Regelkreis in der von Bubb (1993) präzisierten Form im Detail analysiert werden. Aus heutiger Sicht erfüllt dieser die Forderungen nach einem allgemeingültigen Modell, das in unterschiedlichen Detaillierungsgraden zur Anwendung kommen kann. Abbildung 2-5 zeigt den Regelkreis mit einem Fokus auf das Zusammenspiel von menschlicher Wahrnehmung und Bedienelementen im Fahrzeug. Die dazu folgenden Ausführungen orientieren sich an Bubb (2001).

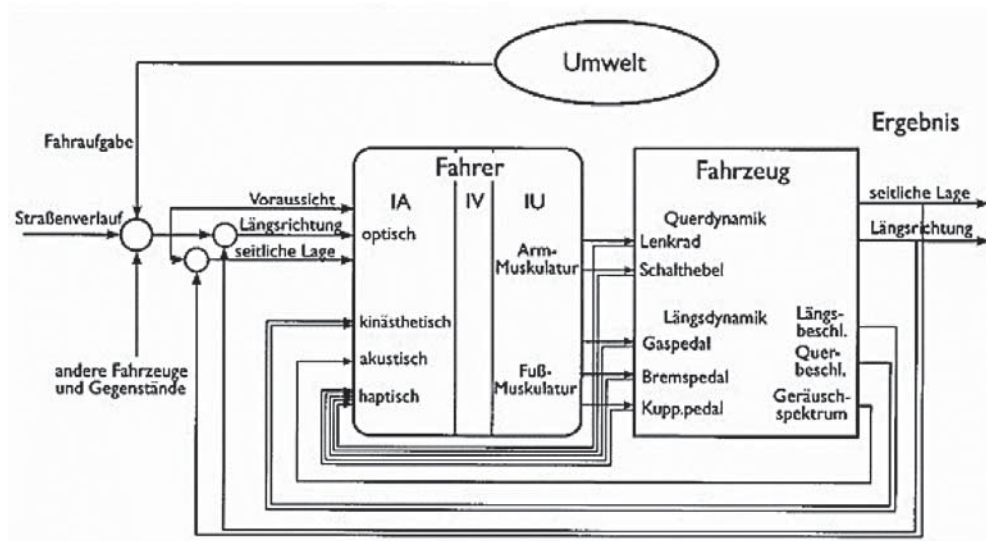


Abbildung 2-5: Der Regelkreis von Fahrer, Fahrzeug und Umwelt nach Bubb (2001)

Die Fahraufgabe bildet als Resultat des Straßenverlaufs und des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer die Führungsgröße der Regelung. Sie ist dabei untergliedert in die momentane Längs- und Querposition, wobei der Voraussicht des Fahrers die bereits angesprochene antizipatorische Steuerungsrolle zukommt. Die Regelstrecke selbst besteht zum einen aus dem Menschen als Fahrer, zum anderen aus dem Fahrzeug mit seinem technisch vorgegebenen Fahrverhalten. Das Ergebnis bzw. die Nachführgröße ergibt sich wiederum aus der Position des Fahrzeugs im Verkehrsraum, also der Lage in Längs- und Querrichtung. Zwischen dem Fahrer und dem Fahrzeug sind diverse Unterregelkreise innerhalb der Regelstrecke dargestellt. Diese entstehen durch die Kopplung des Menschen an das Fahrzeug mittels der Bedienelemente wie Pedalerie und Lenkrad, aber auch durch die menschliche Wahrnehmung für Beschleunigungen und Geräusche. (vgl. Bubb, 2001)

Abbildung 2-5 zeigt die Gliederung des menschlichen Kognitionsprozesses in drei wesentliche Bereiche, die Informationsaufnahme (IA), -verarbeitung (IV) und -umsetzung (IU). Eine Analyse dieser Fähigkeiten und Grenzen des Menschen erfolgt in Kapitel 2.2. Auf die Nachbildung des Elements ‚Fahrzeug‘ durch einen Fahrsimulator wird in Kapitel 2.3 eingegangen.



2.2 Der Mensch als Fahrzeugführer

Im folgenden Abschnitt wird analysiert, auf welche Fähigkeiten der Mensch im Fahrzeug oder bei der Nutzung virtueller Systeme wie einem Fahrsimulator zurückgreifen kann. Aufbauend auf der allgemeinen Beschreibung des Wahrnehmungsprozesses werden die für die Fahrzeugführung relevanten Sinnessysteme erklärt. Auf den Zusammenhang zwischen den Sinnesmodalitäten und der Erfassung fahrdynamischer Größen wird speziell in Kapitel 2.2.3 eingegangen. Dazu werden auch die Grenzen der menschlichen Wahrnehmung aufgezeigt.

2.2.1 Funktionsprinzip der menschlichen Wahrnehmung

Im Weiteren wird der Prozess der menschlichen Wahrnehmung und Handlung als Kreislauf von Einzelschritten betrachtet und damit die genannte Unterteilung in Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung präzisiert. Die Ausführungen dazu folgen Goldstein (2008).

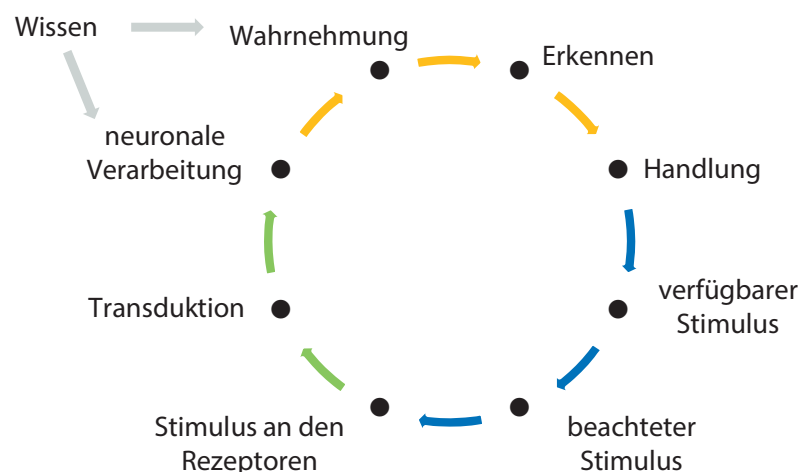


Abbildung 2-6: Der Wahrnehmungsprozess nach Goldstein (2008). Die blauen Pfeile zeigen Reize, die grünen Verarbeitungsprozesse, die orangefarbenen perzeptuelle Antworten.

Goldstein (2008) beschreibt den Wahrnehmungsprozess als Interaktion zwischen der reizgesteuerten Verarbeitung, auch als Bottom-up-Verarbeitung bezeichnet, und der wissensbasierten Verarbeitung, die in Form eines Top-down-Prozesses auf Basis von Vorerfahrungen abläuft. In Folge findet zunächst aus der Vielzahl der Stimuli ein bestimmter Reiz mittels des adäquaten Sinnesorgans Beachtung. Dazu ist es essentiell, dass der Mensch seine Aufmerksamkeit auf diese Reizquelle verlagert. Am Rezeptor des Sinnesorgans beginnt dann der weitere Verarbeitungsprozess, beginnend mit der Transduktion. Darunter versteht man allgemein die Überführung von Energieformen ineinander, hier im Speziellen die Umwandlung der am jeweiligen Rezeptor auftreffenden Energie in ein elektrisches Signal in den Nervenbahnen des Menschen. (vgl. Goldstein, 2008)



Neben der energetischen Wandlung erfolgt beim Prozess der Transduktion auch die Kodierung der Reizintensität. Die Rezeptoren arbeiten dabei innerhalb eines begrenzten Bereichs. Dieser ist zum einen durch eine untere Erregungsschwelle bestimmt, zum anderen aber auch nach oben hin durch ein maximal mögliches Potential, ab dem eine Steigerung der Reizintensität keine weitere Auswirkung besitzt. Hält ein Reiz über längere Zeit an, setzen Gewöhnungseffekte ein, d. h. das Rezeptorpotential geht wieder auf das Ruhepotential zurück. Dies wird als Adaption bezeichnet. (vgl. Handwerker, 2006a; Handwerker & Schmelz, 2010)

Die Potentialänderung im Rezeptor bewirkt anschließend eine Änderung des Aktionspotentials angeschlossener Nervenfasern und damit die Weiterleitung im neuronalen Netz des Menschen. Bei diesem als Transformation bezeichneten Prozess erfolgt eine Wandlung der Amplitude des Rezeptorpotentials in die Frequenz des Aktionspotentials. (vgl. Handwerker & Schmelz, 2010)

Nach der Weiterleitung mittels interagierender Neuronen zum Gehirn setzt die Verarbeitung der Information ein. Wie Abbildung 2-6 zeigt, wird dort mittels lang- oder kurzfristig erworbenen Wissens die Information zur Wahrnehmung gewandelt. Goldstein (2008, S. 6) definiert sie als „bewusste sensorische Erfahrung“. Nachgelagert folgt der ebenfalls wissensbasierte Prozess des Erkennens, also des Zuordnens und Kategorisierens der Wahrnehmung, der dann neue Handlungen auslösen kann (Goldstein, 2008). Gerade deshalb ist für den Prozess der Wahrnehmung und des Erkennens nicht ausschließlich das Leistungsvermögen der Rezeptoren entscheidend. Derselbe Reiz kann geprägt durch persönliche Erfahrungen zu einer interindividuell unterschiedlichen Wahrnehmung führen.

2.2.2 Beschreibung relevanter Sinnesmodalitäten

Nach Handwerker (2006a) besitzt der Mensch vier grundlegende Rezeptortypen zur Erfassung seiner Umwelt. Dies sind mechanische und thermische Rezeptoren sowie Rezeptoren, die auf chemische Reize oder Photonen reagieren. Verschiedene Sinnessysteme vermitteln die dazugehörigen Empfindungen wie Sehen oder Hören, man spricht dann von einer Sinnesmodalität (Handwerker, 2006a).

Wie im folgenden Kapitel 2.2.3 weiter ausgeführt, werden für die Fahrzeugführung maßgeblich das visuelle, auditorische, vestibuläre und somatosensorische System benötigt. Deshalb werden zunächst die wesentlichen Eigenschaften dieser Sinnessysteme näher betrachtet. Auf Basis der Erläuterungen wird anschließend die Interaktion mit fahrdynamischen Eigenschaften diskutiert.



2.2.2.1 Das visuelle System

Zur Wahrnehmung von Lichtreizen im Bereich von 400 bis 700 Nanometern bildet das Auge das visuelle System des Menschen, bestehend aus der Iris als Blende, einer Sammellinse zur Bildverkleinerung und der Retina als Projektionsschicht, in der sich die Rezeptoren für die weitere Reizverarbeitung befinden. Insgesamt sind dies rund 120 Millionen Zellen, wovon ca. 6 Millionen Zapfen dem Farbsehen dienen. Diese sind überwiegend im Bereich der Fovea, dem Ort des schärfsten Sehens, lokalisiert. Der zweite Rezeptortyp, die Stäbchen, sind ausschließlich in der Lage, Helligkeitsunterschiede wahrzunehmen. Als blinden Fleck bezeichnet man die Stelle der Retina, an der der Sehnerv ansetzt und deshalb keine Rezeptoren vorhanden sind. (vgl. Goldstein, 2008)

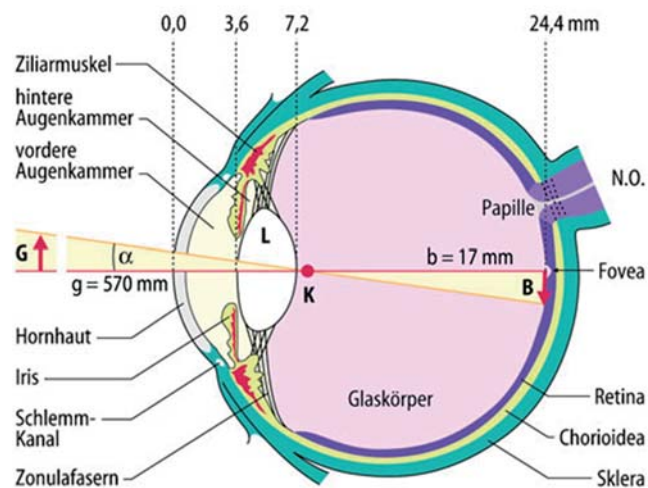


Abbildung 2-7: Schnittdarstellung des Auges mit Illustrierung eines Sichtwinkels α von 1°
(Eysel, 2010)

Zur Regelung der Helligkeit dient die Pupille, die die Öffnung in der Iris und damit den Lichteinfall begrenzt. Der bereits angesprochene Effekt der Adaption kommt auch beim Auge zum Tragen, der Mensch ist dadurch fähig, Helligkeitsunterschiede von 10^{-17} W (Nachtsehen) bis 10^{-14} W (Tagsehen) zu verarbeiten. Verschieden weit entfernte Objekte lassen sich durch den Mechanismus der Akkommodation scharf auf der Retina darstellen. Dazu werden muskulär die Linse und damit die Brechkraft verändert. Die maximale Krümmung definiert den Nahpunkt, den minimalen Abstand für scharfes Sehen. Diese Entfernung steigt im Alter durch die Aushärtung der Linse an. (vgl. Heinecke, 2012)

Nach Heinecke (2012) gelten folgende physiologische Grenzen:

- Die maximale Auflösung beträgt bei einem normalsichtigen Menschen etwa eine Bogenminute, entsprechend können bei einem Abstand von zehn Metern Unterschiede bis



zu 3 mm erkannt werden. Dies gilt allerdings nur für den zentralen Sehbereich bei optimalen Helligkeitsverhältnissen von 100 bis 150 cd/m².

- Die minimal mögliche Zeitdauer, um einen Reiz wahrnehmen zu können, beträgt 15 bis 50 Millisekunden.
- Horizontal ergibt sich durch die Kombination beider Augen bei gleichbleibender Kopfhaltung ein Sichtbereich von 200°, in vertikaler Richtung von der Horizontalen nach oben zwischen 50° und 55°, nach unten 70° bis 80°. Der Bereich des schärfsten Sehens befindet sich dabei aber nur in einem Bereich von $\pm 1^\circ$ um die Sehachse.
- Bei einer Abfolge von Einzelbildern wird ab 70 Hz bei einem auf Helligkeit adaptierten Auge und ab 20 Hz bei einem auf Dunkelheit adaptierten Auge eine konstante Helligkeit wahrgenommen. Unterhalb dieser Werte tritt der Effekt des Flimmerns auf.

Der horizontale Abstand der Augen, der zu unterschiedlichen Sichtwinkeln führt, ermöglicht das räumliche Sehen. Die neuronale Verarbeitung dieses Winkelversatzes (Vergenz) sowie der daraus resultierenden unterschiedlichen Bilder für das linke und rechte Auge (Querdisparation) ermöglichen eine Entfernungseinschätzung im Nahbereich (Eysel, 2010). Als zusätzliche Information wird die Stärke der Akkommodation herangezogen (Goldstein, 2008).

Nach Funk (2003) ist bei einem Abstand über sechs Metern der Ziliarmuskel vollständig relaxiert, es wird dadurch keine zusätzliche Linsenkrümmung verursacht und das Auge ist für den Fernbereich akkommodiert. Im Gegensatz zu den okulomotorischen und binokularen Mechanismen des Nahbereichs werden dann vornehmlich monokulare Tiefenkriterien zur Entfernungseinschätzung genutzt. Goldstein (2008) trennt sie in die Gruppen der bildbezogenen und bewegungsinduzierten Tiefenreize. In der ersten Gruppe finden sich Kriterien wie die Verdeckung bzw. Überlappung von Elementen oder deren Schattenwurf. Weitere Mechanismen sind beispielsweise die Prüfung der relativen Größe gleicher Objekte oder das Wissen über die absolute Größe eines Gegenstands. Auch kann verringerte Farbsättigung oder Unschärfe als Hinweis für Entfernung und Tiefenstaffelung genutzt werden. Als bewegungsinduzierte Kriterien werden das fortschreitende Auf- und Zudecken von Flächen und die Bewegungsparallaxe genannt. Darunter versteht man die im Fortbewegen scheinbar unterschiedlich große Relativgeschwindigkeit naher und ferner Objekte. Nach Eysel (2010) werden vor allem die Verdeckung und die Bewegungsparallaxe als besonders robuste Kriterien herangezogen.

Wesentlich für die Einschätzung von Bewegung und Geschwindigkeit ist der optische Fluss. Dieses Phänomen tritt bei Eigenbewegung auf und kann als Feld der Geschwindigkeitsvektoren ausgehend vom aktuellen Zielpunkt des Betrachters verstanden werden. Objekte nahe am Zentrum besitzen dabei einen kleinen Geschwindigkeitsvektor, während davon entfernte Objekte

pro Zeiteinheit einen größeren Bildausschnitt überstreichen und sich vermeintlich schneller bewegen. Sichtbar wird der Effekt beispielsweise bei Fotografien aus einem bewegten Bezugssystem heraus. Dort weisen Objekte im Randbereich des Bildes deutlich stärkere Verwischungseffekte auf. (vgl. Goldstein, 2008)



Abbildung 2-8: Illustration des optischen Flusses mittels zugehöriger Geschwindigkeitsvektoren (Weber, 2011)

2.2.2.2 Das auditorische System

Das äußere Ohr, Mittelohr und Innenohr als auditorisches System dienen der akustischen Wahrnehmung von Schallreizen. Schallwellen durchlaufen zunächst den Gehörgang und übertragen Schwingungen auf das Trommelfell. Die Formgebung des Gehörgangs wirkt dabei durch Resonanzeffekte verstärkend auf Frequenzen zwischen 2.000 und 5.000 Hz. Im Mittelohr dienen die Gehörknöchelchen zur Übertragung der Schwingungen des Trommelfells auf das Innenohr. Dabei erfüllen sie mehrere Aufgaben. Durch die Hebelwirkung der Gehörknöchelchen und dem Größenunterschied zwischen Trommelfell und ovalem Fenster der Cochlea kommt es zu einer Druckverstärkung. Gleichzeitig erfolgt eine Verringerung der Bewegungsgeschwindigkeit. Durch diesen, auch als Impedanzanpassung bezeichneten Vorgang, wird die Schwingungsübertragung beim Übergang vom luftgefüllten System des Mittelohrs in das flüssigkeitsgefüllte System des Innenohrs ermöglicht. (vgl. Zenner, 2010b)

Im Inneren der Cochlea erfolgt die Schwingungsweiterleitung mittels einer Wanderwelle in den cochlearen Membranen. Mit diesen ist das Corti-Organ, das die inneren und äußeren Haarzellen enthält, verbunden. Die schwingungsinduzierten Relativbewegungen zwischen den Membranen lenken die Stereozilien, die Spitzen der Haarzellen, aus. Dies bewirkt letztendlich die Transduktion des Schallsignals in ein neuronales Signal. (vgl. Zenner, 2010b)

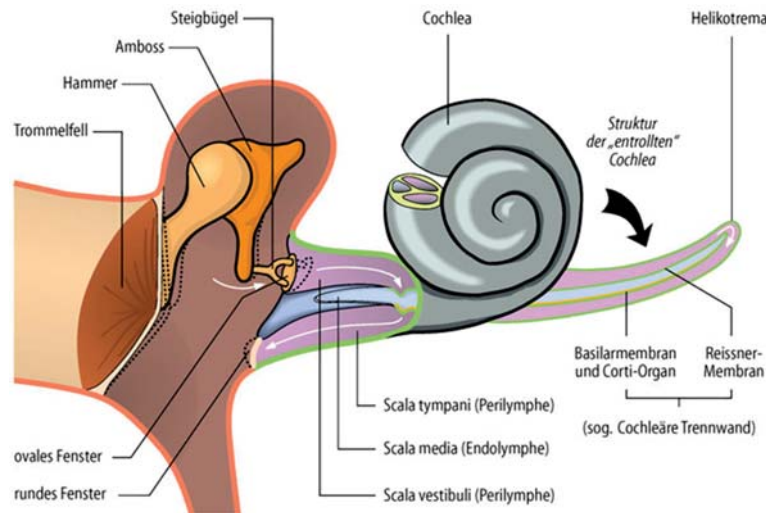


Abbildung 2-9: Aufbau des Ohrs (Zenner, 2010b)

Das auditorische System des Menschen weist nach Goldstein (2008) folgende physikalischen Grenzen auf:

- Schalldruckpegel werden zwischen 0 dB (Wahrnehmungsschwelle) und 140 dB (Schmerzschwelle) erfasst. Zur empfundenen Lautheit als psychologische Erfahrung besteht dabei ein nichtlinearer Zusammenhang. Beispielsweise führt eine Erhöhung des Schalldrucks von 40 auf 50 dB fast zu einer Verdopplung der Lautheit.
- Der Hörbereich des Menschen erstreckt sich von 20 bis 20.000 Hz. Die Hörschwelle ist dabei abhängig von der jeweiligen Frequenz. Im Bereich hoher und tiefer Töne sind deutlich größere Schalldruckpegel notwendig.

Wesentlich für die akustische Erfassung der Umgebung ist die Fähigkeit des Richtungshörens. Goldstein (2008) nennt dazu zwei physiologische Mechanismen, die Detektion von interauralen Zeitdifferenzen und die Organisation von Hirnstrukturen des auditorischen Systems mittels topographischer Karten. Ersterer bezeichnet den Effekt, dass Neuronen existieren, die auf den Laufzeitunterschied von Schallwellen zwischen dem linken und rechten Ohr reagieren. Unter dem Begriff der topographischen Karten ist zu verstehen, dass eindeutige Punkte in der neuronalen Struktur des Kortex vorhanden sind, die jeweils genau einer räumlichen Position in der Umgebung zugeordnet sind (Goldstein, 2008). Als Grenzwerte nennt Zenner (2006) Laufzeitunterschiede von $3 \cdot 10^{-5}$ Sekunden bei Intensitätsdifferenzen von 1 dB. Die daraus resultierende Auflösung beträgt 3° (Zenner, 2006).

2.2.2.3 Das vestibuläre System

Die Lage- und Bewegungsempfindung im Raum wird mittels des vestibulären Systems ermöglicht. Die zugehörigen Organe finden sich im Labyrinth des Innenohrs und bestehen aus den



drei, jeweils senkrecht zueinander stehenden Bogengangsorganen (horizontaler, vorderer und hinterer Bogengang) und den beiden Makulaorganen (Macula utriculi und Macula sacculi). Zu unterscheiden sind die beiden Organarten hinsichtlich des adäquaten Reizes. Die Bogengangsorgane sprechen auf rotatorische Beschleunigungen an, die Makulaorgane auf lineare Beschleunigungen. Die Funktionsweise dagegen ähnelt sich. Vergleichbar mit den Rezeptoren in der Cochlea löst die Bewegung von Haarzellen die Reizübermittlung aus. Die Haarzellen sind eingebettet in eine gallertige Masse, im Fall der Bogengangsorgane Cupula, bei den Makulaorganen Otolithenmembran genannt. Der Begriff Otolith bezeichnet Kalziumkarbonatkristalle, mit denen diese Membran besetzt ist. Das Labyrinth ist zusätzlich mit einer Flüssigkeit, der Endolymphe, gefüllt. (vgl. Zenner, 2010a)

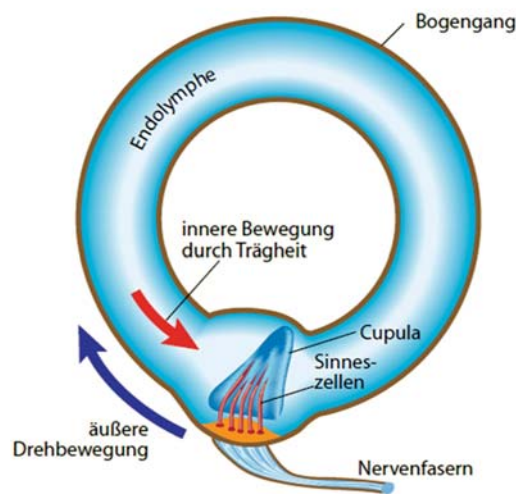


Abbildung 2-10: Funktionsprinzip eines Bogengangs (Fritsche, 2013)

Die Selektion der Stimuli nach translatorischen und rotatorischen Beschleunigungen erfolgt über den Dichteunterschied zwischen der Endolymphe und der Cupula bzw. Otolithenmembran. Tritt eine lineare Beschleunigung auf, bewegt sich die Otolithenmembran relativ zur Endolymphe, da ihre spezifische Dichte durch die Einlagerung der Kalziumkarbonatkristalle höher und damit die Massenträgheit größer ist. Aus dieser Bewegung resultieren die Verformung der Haarzellen und die Reizübermittlung in den angeschlossenen Nervenbahnen. Die Dichte der Cupula hingegen ist mit der Dichte der Endolymphe vergleichbar, somit finden keine Relativbewegung und folglich auch keine Reizübermittlung einer Drehbewegung statt. Im Fall einer rotatorischen Beschleunigung durch eine Bewegung des Kopfes bzw. des Gesamtkörpers tritt der Effekt der Massenträgheit in Rotationsrichtung auf. Die Endolymphe im Bogengang rotiert damit langsamer als der restliche Körper. Die Cupula ist aber mit dem knöchernen Bogengang, der sich ortsfest im Innenohr befindet, verwachsen und führt die Rotationsbewegung in der



Geschwindigkeit des Kopfes aus. Die Endolymphe baut dadurch Druck gegen die Cupula auf, es kommt zur Relativbewegung und der Verformung der Haarzellen. (vgl. Zenner, 2010a)

Allgemeingültige Wahrnehmungsschwellen des vestibulären Systems können nicht angegeben werden, da zahlreiche Einflussgrößen und Interaktionen zu beachten sind. Heißing, Kudritzki, Schindlmaister und Mauter (2000) nennen als Beispiele die Einwirkdauer, Amplitude und Frequenz der Bewegung. Daraus resultieren die in Tabelle 2-1 gezeigten, teils sehr heterogenen Werte.

Tabelle 2-1: Wahrnehmungsschwellen für translatorische und rotatorische² Beschleunigungen nach Heißing et al. (2000)

Translatorische Beschleunigung [m/s ²]		Rotatorische Beschleunigung [°/s ²]	
longitudinal	0,02 – 0,8	Wanken	0,1 – 0,2
transversal	0,05 – 0,1	Nicken	0,1 – 0,2
vertikal	0,02 – 0,05	Gieren	0,05 – 5

Weiterhin muss zwischen klinischen Studien, die ausschließlich das vestibuläre System analysieren, und Anwendungsfällen, die auch Interaktionen mit weiteren Sinnen miteinbeziehen, differenziert werden. Ohne visuelle und akustische Reize beschreibt Kingma (2005) Schwellen für translatorische Beschleunigungen, die sich im Bereich der Werte von Tabelle 2-1 befinden. In einer Studie von Nesti et al. (2012) werden rotatorische Wankbeschleunigungen während einer Fahrsimulatorfahrt ermittelt. Hier findet sich im Vergleich zu Heißing et al. (2000) eine deutlich höhere Wahrnehmungsschwelle von 6,3 °/s².

2.2.2.4 Das somatosensorische System

Nach Treede (2010) gliedert sich das somatosensorische System in fünf Submodalitäten. Die Mechanorezeption dient der Wahrnehmung von Druck, Berührung und Vibration, die Propriozeption der Wahrnehmung von Lage, Bewegung und Kraft. Weitere Submodalitäten sind die Thermorezeption zur Wahrnehmung von Hitze oder Kälte, die Nozizeption zur Schmerzwahrnehmung und die Viszerozeption zur Wahrnehmung von Organtätigkeiten im Körper. Zur Erfüllung der primären Fahraufgabe im Fahrzeug besteht bei den drei letztgenannten kein direkter Zusammenhang, weshalb keine weitere Betrachtung dieser Modalitäten erfolgt.

² Wanken, Nicken und Gieren bezeichnen im Kontext der Fahrdynamik generell Drehbewegungen um die Längs-, Quer- bzw. Hochachse des Fahrzeugs.



Die Mechanorezeption wird durch vier Zelltypen, den Merkel-Zellen und den Meissner-, Ruffini- und Pacini-Körperchen ermöglicht. Diese weisen unterschiedliche Adaptionsraten auf und sind deshalb selektiv für bestimmte Frequenzbereiche. Besonders im Bereich der Hände und des Gesichts ist die Rezeptordichte hoch und somit eine präzise Auflösung von Umgebungsreizen möglich. (vgl. Treede, 2010)

Propriozeption beschreibt die „Sensorik des Bewegungsapparates“ (Handwerker, 2006b, S. 203) und fasst als Überbegriff die Positions- und Bewegungsempfindung sowie die Empfindung von Kontraktionskraft in der Skelettmuskulatur zusammen. Zur Erfassung von Bewegung bzw. Lage finden sich in den Muskeln als Rezeptoren die primären und sekundären Muskelspindeln. Auch die Ruffini-Rezeptoren bieten in geringem Umfang Informationen zur jeweiligen Stellung der Gelenke. Die aktive Kraft in der Muskulatur wird durch das Golgi-Sehnenorgan ermittelt. (vgl. Handwerker, 2006b; Treede, 2010)

Wesentliche Sinnesleistungen des Lage-, Kraft- und Bewegungssinns sind nach Treede (2010) die folgenden:

- Der Lagesinn kann vollständig unabhängig von optischen Informationen die Gelenkstellung ermitteln. Diese wird sowohl bei einer aktiven als auch bei einer passiv herbeigeführten Bewegung erkannt. Adaptionseffekte treten nicht auf, der Mensch ist sich auch nach einer länger andauernden Körperhaltung seiner Gelenkstellungen bewusst.
- Der Kraftsinn verfügt über eine Unterschiedsschwelle, die ungefähr 5 % der ursprünglich aufgebrachten Kraft beträgt.
- Die Wahrnehmungsschwelle des Bewegungssinns ist abhängig von der Winkelgeschwindigkeit der durchgeführten Bewegung. Auch bestehen Differenzen zwischen körpernahen und körperfernen Gelenken. Das Auflösungsvermögen von Bewegungen im Schultergelenk ist beispielsweise höher als im Fingergelenk.

Nach Handwerker (2006b) werden für die Propriozeption auch Informationen aus dem vestibulären System herangezogen. Gerade am Beispiel von Kippbewegungen des Kopfes lässt sich verdeutlichen, dass der Mensch in der Lage ist, diese als selbst ausgeführte Bewegung oder aber als Folge von äußeren Beschleunigungskräften zu verstehen. Diese Kopplung von Bewegungs- und Beschleunigungsempfindung ist insbesondere bei der Gestaltung von Bewegungsplattformen in der Fahrsimulation von Bedeutung.

2.2.3 Multimodale Wahrnehmung fahrdynamischer Größen

Grundvoraussetzung für die Erfassung einer Fahrzeugeigenschaft aus dem Bereich der Fahrdynamik und des Fahrkomforts ist die Wahrnehmung der jeweiligen fahrphysikalischen Größen durch den Fahrer. Nach Kapitel 2.2.1 lässt sich zusammenfassend folgern, dass dabei für den

zugehörigen Reiz Aufmerksamkeitsressourcen aufgebracht werden müssen und er oberhalb der Erregungsschwelle des jeweiligen Rezeptors zu liegen hat. Auf Basis von vorhandenem Wissen kann dann eine neuronale Verarbeitung erfolgen. Daran schließt sich das Erkennen, also das bewusste Zuordnen der Wahrnehmung an (Knappe, 2009).

Die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Sinnesmodalitäten ermöglichen die teilweise redundante Erfassung der unterschiedlichen fahrdynamischen Größen. Eine Darstellung der Zusammenhänge findet sich bei Tomaske (1983), erweitert von Lange (2008) sowie in vergleichbarer Form bei Eckstein (2001), angepasst von Wolf (2009) und Schimmel (2010). Tabelle 2-2 führt diese Ergebnisse zusammen.

Tabelle 2-2: Zuordnung fahrdynamischer Größen zu den adäquaten Sinnessystemen

	Visuell	Akustisch	Mechano- rezeptorisch	Proprio- zeptiv	Vestibulär
Absolut- bewegung	$\kappa, v, \beta, \dot{\psi}$		a_{trans}	a_{trans}	$a_{\text{trans}}, a_{\text{rot}}$
Relativ- bewegung	$\Delta s, \Delta v, \Delta y, \Delta \psi, \Delta v$	L_{Wind}			
Straße	$b, \kappa_{\text{STR}}, \alpha$	L_{STR}			
Verkehrs- teilnehmer i	$v_i, \Delta y_i$	L_i			
Fahrzeug		L_{FZG}	M_{LR}	M_{LR}	
Bediengrößen	δ_{LR}		F_{Ped}	$\delta_{\text{LR}}, F_{\text{Ped}}, \alpha_{\text{Ped}}$	

a_{trans}	Translatorische Beschleunigungen in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung	α	Straßensteigung
a_{rot}	Rotatorische Beschleunigungen (Wank-, Nick- und Gierbeschleunigung)	α_{Ped}	Pedalwinkel
b	Straßenbreite	β	Schwimmwinkel
F_{Ped}	Kraft bei Pedaleriebetätigung	δ_{LR}	Lenkradwinkel
L	Schalldruckpegel diverser Quellen	κ	Bahnkrümmung
M_{LR}	Handmoment am Lenkrad	κ_{STR}	Krümmung des Straßenverlaufs
Δs	Abstand in Längsrichtung	Δv	Kurswinkelfehler



v	Geschwindigkeit	$\dot{\psi}$	Giergeschwindigkeit
Δv	Differenzgeschwindigkeit	$\Delta\psi$	Gierwinkelfehler
Δy	Querabweichung des Fahrzeugs		

Für die Erfüllung der Fahraufgabe sind die Sinnessysteme von unterschiedlicher Bedeutung. Rein anschaulich zeigt sich in Tabelle 2-2 eine Dominanz des visuellen Systems. Zurückgehend auf ältere Quellen, wie beispielsweise Rockwell (1971), wird als Anteil des visuellen Systems an der Informationsaufnahme des Fahrers oftmals ein Wert von 90 % genannt. Nach Sivak (1996) ist die Angabe absoluter Werte mangels präziser Daten und eines Messsystems, das die aufgenommene Informationsmenge zahlenmäßig beschreiben kann, aber kritisch zu hinterfragen. Für das Führen eines Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr ist dennoch unbestritten, dass dem visuellen System eine wesentliche Rolle zukommt. Nachvollziehbar ist dies am Beispiel der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern, die fast ausschließlich visuell möglich ist.

Das visuelle System bildet auch die Grundvoraussetzung zur Wahrnehmung von Geschwindigkeit mittels des in Kapitel 2.2.2.1 beschriebenen Prinzips des optischen Flusses. Zusätzlich zu den rein visuellen Reizen sind Informationen des vestibulären Systems notwendig, beispielsweise um Fremd- von Eigenbewegung unterscheiden zu können (Goldstein, 2008). Weiterhin besteht eine starke Korrelation der visuellen Geschwindigkeitswahrnehmung zur akustischen Wahrnehmung mit der Tendenz, bei reduzierten Fahrgeräuschen die Geschwindigkeit zu unterschätzen (Gratzer, 2007). Diesen Zusammenhang konnte bereits Bubb (1977) bei einer Vergleichsstudie von realer und simulierter Fahrt nachweisen. Bei beiden Szenarien zeigte sich die akustische Information als wesentlich für die verbesserte Einschätzung des Geschwindigkeitsniveaus.

Die Vestibularorgane alleine können keine konstanten Translations- oder Rotationsbewegungen wahrnehmen (Blümle, 2003). Wie in Kapitel 2.2.2.3 beschrieben, resultieren die Beschleunigungsempfindungen durch Relativbewegung und Massenträgheit von Endolympe zu Cupula bzw. Otolithenmembran. Durch diesen Aufbau eignen sich die Gleichgewichtsorgane aber insbesondere für eine Detektion von Bewegungsänderungen. Typisch fahrdynamische Fragestellungen beruhen oftmals auf der Bewertung von Unterschieden, die sich im veränderten Bewegungsverhalten des Fahrzeugs bemerkbar machen. Gerade wenn sich der Fokus von der allgemeinen Teilnahme am Straßenverkehr hin zur Fahrzeugentwicklung und -beurteilung verschiebt, gewinnt das vestibuläre Sinnessystem an Bedeutung. Eine weitere Ursache hierfür ist der Zeitpunkt der Informationsaufnahme. Wie Warren (1995) verdeutlicht, ist, im Gegensatz zur schnellen Erfassung von Position und Geschwindigkeit, die Wahrnehmung der Beschleunigung mittels des visuellen Systems mit einer größeren Zeitverzögerung verbunden, da nur das



Ergebnis der Beschleunigung erfasst werden kann. Dagegen ermöglicht das vestibuläre System das in Tabelle 2-1 beschriebene hohe Auflösungsvermögen für zeitliche Veränderungen.

Durch die Hinzunahme von Informationen aus dem somatosensorischen System entsteht der für fahrdynamische Fragestellungen wichtige subjektive Eindruck des Fahrers. Dieser Zusammenhang zeigt sich im Speziellen bei der Wahrnehmung der Lenkradbetätigung. Die vornehmlich propriozeptiv wahrgenommenen Lenkradmomente und -winkel werden durch die Wahrnehmung von Quer- oder Gierbeschleunigung im vestibulären System ergänzt und vermitteln so dem Fahrer eine vollständige Rückmeldung zu seiner Lenkeingabe. Eine weiterführende Analyse dieser Vorgänge sowohl für die Informationsaufnahme als auch -umsetzung findet sich beispielsweise bei Wolf (2009).

Als weiteres Beispiel für die gemeinsame Erfassung von Beschleunigungen ist das Zusammenspiel des vestibulären und somatosensorischen Systems bei der Kopplung von Fahrer und Sitz zu nennen. Die im Gleichgewichtsorgan empfundenen Beschleunigungen können durch den Druck auf die Haut an den Sitzflächen oder bei einer Kurvenfahrt an den Sitzseitenwangen redundant wahrgenommen werden.

Am Beispiel querdynamischer Fahrscenarien wird in der Arbeit von Schimmel (2010) die Informationsaufnahme des Fahrers modelliert. Als wesentliche Größen der primären Fahraufgabe werden die folgenden genannt:

- Die Bahnkrümmung und Geschwindigkeit sowie der Schwimmwinkel und die Giergeschwindigkeit als Größen des visuellen Systems
- Rotatorische und translatorische Beschleunigungen als Größen des vestibulären und des somatosensorischen Systems
- Der Lenkradwinkel als Größe des visuellen und propriozeptiven Systems
- Das Lenkradmoment als Größe der Mechanorezeption und Propriozeption

Aus diesen wird ein allgemeingültiges Empfindungsmodell abgeleitet, mit dem Ziel, menschliches Beurteilungsverhalten objektivierbar zu machen. Weitere Erläuterungen zur objektiven und subjektiven Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften finden sich in Kapitel 2.4.



2.3 Fahrsimulation zur Abbildung von Fahrverhalten

Fahrsimulation bietet die Möglichkeit, das Fahrzeug wie auch die Umwelt im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis virtuell darzustellen. Im Bereich der Fahrdynamikentwicklung können damit die in Kapitel 1 beschriebenen Vorteile, wie eine Reduzierung realer Versuchsfahrzeuge, umgesetzt werden.

Nach einem Überblick zu Technik und Nutzungsszenarien schließt sich eine Klassifizierung der Simulationssysteme an. Anschließend wird im Speziellen auf den Anwendungsfall der Fahrdynamikentwicklung eingegangen. Zusätzlich erfolgt ein Abgleich der technischen Lösungsansätze auf Basis der in Kapitel 2.2 dargestellten Grenzen der menschlichen Wahrnehmung.

2.3.1 Thematischer Überblick

Fahrsimulation beschreibt die Abbildung eines Fahrzeugs und dessen Umfeld in einer virtuellen Umgebung mit dem Ziel, einen realistischen Ersatz dieser beiden Elemente im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis zu schaffen.

Die Idee zu diesem Vorgehen stammt ursprünglich aus dem Bereich des Pilotentrainings. Ein Beispiel einer frühen technischen Umsetzung eines Flugsimulators findet sich im Patent von Link (1931). Allen, Rosenthal und Cook (2011) nennen die 1960er Jahre mit der Einführung erster Computersysteme als Ausgangspunkt für die Entwicklung der Fahrsimulation. Die Einsatzbereiche eines Fahrsimulators sind äußerst vielfältig. Nach Negele (2007) werden damit u. a. die nachfolgend genannten Analysen ermöglicht:

- **Fahrerverhalten:** Mentale Belastung, Aufmerksamkeit und Ermüdungseffekte, Alterseffekte, medizinische Zustände, Fahrerausbildung und Fähigkeitserwerb
- **Fahrverhalten und Fahrzeugbedienung:** Fahrdynamik und -komfort, Innenraumgestaltung und Mensch-Maschine Schnittstellen, Fahrerassistenz- und Regelsysteme
- **Umwelt:** Straßen- und Fahrbahnrandgestaltung, Verkehrszeichen und -signale, Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche, Interaktion mit Verkehrsteilnehmern, Witterungs- und Sichtbedingungen

Je nach Untersuchungsgegenstand und Zielgruppe finden Fahrsimulatoren in unterschiedlichen Ausprägungen ihrer technischen Details Anwendung. Ihnen gemeinsam ist der prinzipielle Aufbau, wie ihn Abbildung 2-11 nach Augusto und Sandin (2013) zeigt.

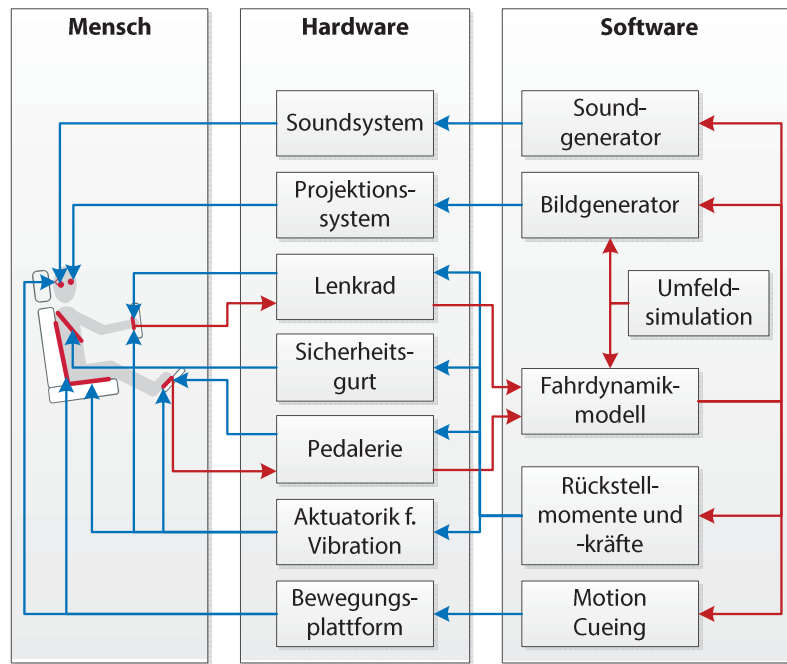


Abbildung 2-11: Schematische Struktur der Hard- und Softwarekomponenten eines Fahrsimulators und deren Interaktion mit dem Fahrer nach Augusto und Sandin (2013)

Nach diesem Schema werden die Lenkrad- und Fahrpedaleingaben als Steuersignale des Fahrers an einen Simulationsrechner übermittelt. Ein Fahrdynamikmodell errechnet dort im Abgleich mit der Umfeldsimulation, in der beispielsweise die Streckenmodelle hinterlegt sind, das resultierende Fahrverhalten des Fahrzeugs in der Simulation. Dabei werden auch die Ausgangssignale für die Bild- und Soundwiedergabe erzeugt.

Ein System, das über räumliche Bewegungsfreiheitsgrade verfügt, mit dem Ziel vestibuläre Informationen zu simulieren, wird als dynamischer Fahrsimulator bezeichnet. Anderenfalls spricht man von einem statischen Fahrsimulator. Weiterhin finden sich vielfältige Möglichkeiten dem Fahrer somatosensorische Informationen zu vermitteln. Dazu zählen neben der Erzeugung von Rückstellkräften und -momenten an Lenkrad und Pedalerie auch Systeme, die fahrzeugtypische Vibrationen wiedergeben können. Einen Überblick dazu geben die Kapitel 2.3.4.2 und 2.3.4.3.

2.3.2 Validität von Simulatorversuchen

Der Einsatz von Fahrsimulatoren bietet gegenüber der Untersuchung von Forschungs- und Entwicklungsfragen im Realfahrzeug einige entscheidende Vorteile. Wie in Kapitel 1.1 bereits beschrieben, bilden Zeit- und Kostenaspekte eine wesentliche Motivation zum Einsatz dieser virtuellen Technologie. Hinsichtlich konkreter Fragen der Versuchsplanung und -durchführung



ergeben sich darüber hinaus weitere positive Aspekte. Aussagekräftige Versuchsergebnisse fordern die Erfüllung der Kriterien der Objektivität, der Reliabilität und der Validität. Gerade hinsichtlich der Reliabilität ist eine Simulatorstudie dem Realversuch überlegen. Es ist leicht nachvollziehbar, dass die Einhaltung exakt gleicher Versuchsbedingungen im Wiederholungsfall, beispielsweise hinsichtlich Streckenzustand, Witterungs- oder Verkehrsbedingungen im Realfahrzeug nicht immer möglich ist. Im Bereich virtueller Technik ist dagegen oftmals nur das erneute Aufrufen einer gespeicherten Konfiguration des Simulators erforderlich. Weiterhin können sicherheitskritische Fahrmanöver und Verkehrssituationen analysiert werden, die ansonsten nicht oder nur mit aufwendigen Sicherheitsmaßnahmen darstellbar wären. Insbesondere bei der Entwicklung von Fahrerassistenz- oder Fahrdynamikregelsystemen ist dies von Bedeutung. Beispielsweise beschreiben Vollrath und Rataj (2006) ein Versuchsszenario zur Ermittlung von Stressfaktoren des Fahrers in Kreuzungssituationen. Feldversuche ermöglichen dabei, reale Versuchsdaten zu erfassen und die wesentlichen Einflussfaktoren zu ermitteln. Nachgelagerte Versuche im Simulator bieten dann risikofrei die präzise Analyse einzelner Faktoren durch deren gezielte Variation.

An diesem Beispiel lässt sich allerdings auch eine Herausforderung beim Einsatz von Fahrsimulatoren ableiten. Nachdem den Probanden bewusst ist, dass es sich um eine künstliche Fahrsituation handelt, können ihre Reaktionen beim Auftreten kritischer Ereignisse oder auch bei der Einhaltung von Verkehrsregeln vom Fahren im Realfahrzeug abweichen. Um regelkonformes Verhalten und ein vergleichbares Sicherheitsbewusstsein zu erreichen, existieren Methoden wie beispielsweise finanzielle Belohnungs- und Bestrafungssysteme. (vgl. Ranney, 2011)

Generell kann durch mangelnde Realitätstreue bei der Abbildung des Fahrzeugs bzw. seiner Umwelt ein zum Realfahrzeug nicht vergleichbares Fahrer- oder Fahrzeugverhalten auftreten. Es ergibt sich demnach also die Herausforderung, die Validität von Simulatorversuchen nachzuweisen.

Vollrath (2015) trennt den Validitätsbegriff in zwei Kategorien. Externe Validität bezeichnet demnach die Repräsentativität und Übertragbarkeit eines Versuchs und seiner Ergebnisse auf reale Gegebenheiten. Als Kriterien werden die Wahl der Stichprobe, die Gültigkeit der Messmethoden und die Realitätsnähe der Versuchssituation, um unverändertes Verhalten der Probanden zu erzielen, angeführt. Interne Validität dagegen bedeutet, dass ein im Versuch gefundener Effekt zweifelsfrei auf den Einfluss der unabhängigen Versuchsvariablen zurückgeführt werden kann. (vgl. Vollrath, 2015)

Zusätzlich lässt sich in Bezug auf Messwerte absolute und relative Validität unterscheiden. Im Kontext der Fahrsimulation bedeutet absolute Validität, dass Ergebnisse einer Fahrsimulatorstudie mit einem Versuch im Realfahrzeug vollständig übereinstimmen. Ist die Größenordnung



der Ergebnisse unterschiedlich, aber ein vergleichbarer Trend vorhanden, kann zumindest von relativer Validität gesprochen werden.

Eine weitere Unterteilung des Validitätsbegriffs findet sich beispielsweise bei Godley, Triggs und Fildes (2002) oder Mullen, Charlton, Devlin und Bédard (2011). Es wird die physikalische Validität des Simulators bei der Abbildung technischer Größen des Fahrzeugs einerseits und andererseits die Validität in Bezug auf das Fahrerverhalten unterschieden. Auch Möllmann (2011) trennt diese, hier als psychologische Validität bezeichnet, von physikalischer Validität.

Wie in den folgenden Kapiteln verdeutlicht wird, können Fahrsimulatoren meist keine vollständige Abbildung der Bedingungen im Realfahrzeug gewährleisten. Nachweise für absolute, physikalische Validität finden sich deshalb nur selten (Mullen et al., 2011). Umso wichtiger ist daher ein ausreichend hoher Immersionsgrad³ des Fahrers in der Simulationsumgebung, um den Nachweis der Validität hinsichtlich des Fahrerverhaltens erbringen zu können. Dazu ist die Verwendung geeigneter Kennwerte von besonderer Bedeutung. Abendroth, Schreiber, Bruder, Maul und Maul (2012) weisen darauf hin, dass für viele Fragestellungen verstärkt Messwerte, die charakteristisch für die Bahnführung sind, erhoben werden sollten. Beispiele hierfür sind das Blickverhalten oder auftretende Querschleunigungen. Hintergrund dieser Überlegung ist, dass die Aufgaben des Fahrers auf der Stabilisierungsebene durch Fahrerassistenz- und Regelsysteme zunehmend automatisiert werden (Abendroth et al., 2012).

Generell kann ein Fahrsimulator nicht als vollständig und dauerhaft validiertes System betrachtet werden. Mullen et al. (2011) verdeutlicht, dass eine Validierung für jeden einzelnen verwendeten Kennwert zu erfolgen hat. Insbesondere ist dabei auch die Auswahl der Nutzer- bzw. Probandengruppe zu berücksichtigen (Mullen et al., 2011). Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass für jede Kombination aus Fahrsimulator und Fragestellung bzw. Versuchsszenario eine gesonderte Validierung erfolgen sollte (vgl. Abendroth et al., 2012).

2.3.3 Klassifikation von Fahrsimulatoren

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben, sind die Einsatzbereiche von Fahrsimulatoren äußerst vielfältig. Die damit verbundenen, heterogenen Anforderungen an die Systeme führen deshalb zu den verschiedenartigsten technischen Lösungen. Eine Methodik zur Klassifizierung von Simulatoren nach dem benötigten technischen Aufwand findet sich bei Negele (2007). Hier werden die Anforderungen an einen Fahrsimulator anhand zweier Dimensionen abgeleitet. Zum

³ Der Begriff der Immersion steht allgemein für den Bewusstseinszustand in einer Simulationsumgebung, die virtuelle Welt als real anzusehen. Dazu ist die präzise Nachbildung von Umgebungsreizen essentiell.



einen ist dies die Aufgabenstellung im Sinne der primären, sekundären oder tertiären Fahraufgabe. Bei ersterer wird zusätzlich nach der Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene unterschieden. Zum anderen wird die zum Ausführen der Aufgabe benötigte Reaktion in Form von fertigkeit-, regel- oder wissensbasiertem Handeln nach dem Modell von Rasmussen (1983) für eine Aufwandsabschätzung genutzt.

Die grundsätzliche Annahme besteht darin, dass der Mensch als Fahrzeugführer bei ausreichendem Zeitbudget in der Lage ist, „die Unzulänglichkeiten der Simulation mental so auszugleichen, dass seine Reaktion als ausreichend valide angesehen werden kann“ (Negele, 2007, S. 95). Als besonders problematisch ist demnach fertigkeitsbasiertes Verhalten auf der Ebene der Stabilisierung zu sehen, da dieses auf direkten Reiz-Reaktions-Mechanismen beruht. Nach Negele (2007) sollte in diesem Fall hoher technischer Aufwand eingesetzt werden, damit die Simulation nicht von realen Gegebenheiten abweicht und jedes für die Fahraufgabe relevante Sinnessystem unverfälschte Informationen erhält.

Erfahrungen aus dem Motorsport lassen aus heutiger Sicht allerdings den Schluss zu, dass bei hochtrainierten Experten auch in diesem Bereich Einschränkungen möglich sind. Beispielsweise wurden seit einer erweiterten Einschränkung realer Testfahrten in der Formel 1 im Jahr 2009 Simulatoren aufgebaut, die der Feinabstimmung dieser Rennfahrzeuge dienen. Erforderlich hierzu ist fertigkeitsbasiertes Verhalten des Fahrers mittels stabilisierender Regeleingriffe. Eine Nachbildung der auftretenden Beschleunigungen ist hier bei Weitem nicht möglich, dennoch können fahrdynamische Kennwerte beurteilt werden.

Unbestritten aber ist, dass gerade die Bewertung von Fahrverhalten umfangreichen technischen Aufwand mit sich bringt, um das valide Erleben und damit die Beurteilung dieser Gruppe von Fahrzeugeigenschaften sicherzustellen. Einen Überblick über die technischen Lösungen gibt das folgende Kapitel 2.3.4.

2.3.4 Stand der Technik

Bereits bei Bernotat (1970) finden sich die folgenden Anforderungen an Fahrsimulatoren:

„Um den Einfluss aller relevanten Informationskanäle zu berücksichtigen, ist ein hoher Echtheitsgrad der Simulation notwendig. Dies bedeutet, daß nicht nur der Führerraum des Fahrzeugs mit seinen Anzeigen und Bedienelementen naturgetreu nachzubilden ist, sondern auch die akustischen und taktilen Anzeigen, die Beschleunigungseindrücke und Außensicht sind mit großem Aufwand nachzubilden.“ (Bernotat, 1970, S. 369)

Durch die fortschreitende Entwicklung im Hard- und Softwarebereich gelingt es heute bereits, in vielen Teilbereichen eines Simulators diese Forderungen zu erfüllen. Kemeny und Panerai



(2003) nennen dazu eine klare Hierarchie der Teilsysteme eines Simulators hinsichtlich des Einflusses auf den Realitätsgrad. Am bedeutendsten ist demnach die Gestaltung des Visualisierungssystems, gefolgt von der Darstellung vestibulärer Reize durch ein Bewegungssystem und propriozeptiver Reize beispielsweise durch Lenkaktuatoren. Abschließend folgt die Simulation von Geräuschen mittels eines Soundsystems.

Im Weiteren werden in dieser Reihenfolge Technologien vorgestellt, die nach dem momentanen Stand der Technik Sinneseindrücke möglichst realistisch darstellen können. Der Fokus liegt dabei auf Systemen, die für die Simulation fahrdynamischer Eigenschaften zielführend sind. Deren technische Daten werden außerdem mit bekannten Schwellen menschlicher Wahrnehmung in Bezug gesetzt.

2.3.4.1 Visualisierungssysteme

Die optische Darstellung der Simulationsumgebung erfolgt meist über Monitore oder die Kombination aus Projektor und Projektionsfläche. Außerdem werden direkt am Kopf getragene Videobrillen, sogenannte Head-Mounted-Displays (kurz: HMD), zur Bildgebung genutzt. Die Verwendung von Monitoren bietet zumeist den Vorteil der Platzersparnis, beispielsweise lassen sie sich bei dynamischen Simulatoren auch direkt am Fahrzeug-Mockup⁴ befestigen. Leinwände füllen im Regelfall ein deutlich größeres Sichtfeld aus und besitzen meist einen größeren Abstand zum Fahrer. Dies hat den Vorteil, dass das Auge, wie beim realen Blick auf die Fahrbahn, näher am Fernbereich akkommodiert ist, vgl. Kapitel 2.2.2.1. Um die Entfernungseinstellung des Auges konstant zu halten, sind die Leinwände oftmals gekrümmt. Bei dynamischen Simulatoren, die Bewegungen in mehrere Richtungen ausführen können, finden sich deshalb auch sphärisch gekrümmte Projektionsflächen. Die Akkommodation des menschlichen Auges ist im Besonderen bei der Bildwiedergabe mittels eines HMD als problematisch anzusehen, da das Auge hier vollständig auf den Nahbereich eingestellt ist. Grabe, Pretto, Robuffo Giordano und Bülthoff (2010) weisen für das Befahren eines Slalomkurses eine signifikant höhere Fehlerrate bei Verwendung eines HMD nach, als dies bei der Bilddarstellung mit einem Monitor der Fall ist.

Als wesentliche Faktoren aller bildgebenden Systeme sind die Eigenschaften Helligkeit, Kontrast, Auflösung, Bildwiederholfrequenz und die Geometrie des Sichtfelds zu nennen. Je nach Anwendungsfall des Simulators sind diese Punkte von unterschiedlicher Bedeutung. Für die Bearbeitung von Fragestellungen auf der Ebene der Stabilisierung nennt Negele (2007) eine Auflösung von zwei bis drei Bogenminuten pro Pixel als notwendige Anforderung, um eine ausrei-

⁴ Mockup bezeichnet die Nachbildung des Fahrerplatzes oder (Teil-)Fahrzeugs im Fahrsimulator.



chend gute Darstellung des optischen Flusses und damit des Geschwindigkeitseindrucks zu vermitteln. Für eine präzise Darstellung von Verkehrszeichen ist dagegen eine noch höhere Auflösung notwendig, die deren Lesbarkeit sicherstellt (Negele, 2007). Die Spannbreite typischer Systeme am Markt beträgt nach Greenberg und Blommer (2011) allerdings drei bis sechs Bogenminuten pro Pixel, während das in Kapitel 2.2.2.1 angegebene Auflösungsvermögen einer normalsichtigen Person ca. eine Bogenminute beträgt. Überwiegend aus Kostengründen werden hier im Vergleich zu den Fähigkeiten des menschlichen Auges Vereinfachungen getroffen.

Mit der Wahl eines großen Sichtfeldes (engl.: Field of View) kann im Regelfall ein verbesserter Immersionseffekt für den Fahrer erzielt werden. Für eine realistische Geschwindigkeitswahrnehmung kann als Erklärung wiederum auf den Effekt des optischen Flusses verwiesen werden, da die Wahrnehmung des optischen Vektorfeldes voraussetzt, dass auch im Bereich des peripheren Sehens eine Bilddarstellung erfolgt.

Als wesentliche Anforderung für ein realistisches Blickverhalten gelten eine 360°-Projektion und die Darstellung der Spiegelsicht durch zusätzliche Monitore (Greenberg & Blommer, 2011). In der Literatur finden sich auch Anhaltspunkte für Mindestanforderungen je nach Fahraufgabe. Beispielsweise stellt Bengler (1995) bei einem Sichtbereich von 55° bei Navigationsaufgaben Artefakte in den Daten des Fahrerverhaltens fest, da Kreuzungssituationen nur unzureichend dargestellt werden können. Bengler, Bernasch und Löwenau (1997) analysieren das Blickverhalten im Realfahrzeug und im statischem Simulator mit 42° horizontaler Frontsicht. Für die Blickstrategie und die beachteten Reize in Form der Spurmarkierungen kann während der Kurvenfahrt eine Übereinstimmung zwischen virtueller und realer Versuchsumgebung nachgewiesen werden. Im Fahrsimulator werden allerdings kürzer entfernte Markierungen beachtet, die grafisch höher aufgelöst sind. Dies drückt sich in breiteren horizontalen Blickwinkeln der Probanden aus. Außerdem werden zusätzliche Anhaltspunkte, wie die Spurmarkierungen der Gegenfahrbahn zur Orientierung genutzt. Knappe (2009) weist nach, dass durch eine Einschränkung des Sichtbereichs auf nur 5°, die peripheres Sehen vollständig verhindert, das Fahrerverhalten in Bezug auf die Bahnführung und Querregelung signifikant verändert wird. Als Größenordnung für Fahraufgaben auf einem Fahrkurs nennen Tomaske und Meywerk (2006) für das horizontale Sichtfeld Werte von 180–210°. Zusätzlich verweisen sie darauf, dass insbesondere eine dynamische Bildgebung, also das Mitbewegen der Kameraperspektive beispielsweise bei einer Bremsung, wesentlich für eine Visualisierung im Bereich der Fahrdynamik ist.

Für ein korrektes Geschwindigkeitsempfinden empfiehlt Negele (2007) einen horizontalen Sichtbereich von 120–140°. Bei einem Literaturvergleich kommen Fischer, Eriksson und Oeltze (2012) allerdings zu dem Resultat, dass keine einheitlichen Aussagen zum Zusammenhang zwischen der Größe des Sichtfeldes und der Wahrnehmung von Geschwindigkeiten vorliegen. Auch in ihrer eigenen Studie kann kein Effekt bestätigt werden, allerdings verbessert sich die



Bewertung der Probanden hinsichtlich des Realitätsgrads der Simulation. Einen nachgewiesenen Einfluss auf die Einschätzung der Fahrgeschwindigkeit besitzt dagegen die korrekte Darstellung des Bildausschnitts. Die Ergebnisse von Colombet, Paillot, Mérienne und Kemeny (2010) belegen, dass bei gleichbleibend großer Projektionsfläche ein weiterer Sichtwinkel als in Realität zu langsameren Fahrgeschwindigkeiten, ein engerer Sichtwinkel dagegen zu höheren Geschwindigkeiten führt. Ein signifikanter Effekt ist in dieser Studie bereits bei einer Veränderung von 15 % nachweisbar. Dies verdeutlicht, dass für ein realistisches Geschwindigkeitsempfinden die Perspektive des Fahrers sehr präzise mit den realen Gegebenheiten übereinstimmen muss.

Als weiterer Fortschritt werden vermehrt auch stereoskopische Visualisierungen bei der Fahrsimulation zum Einsatz kommen. Die Erwartungshaltung dabei ist, gerade auch im Nahbereich vor dem Fahrzeug, in dem stereoskopisches Sehen zur Geltung kommt, eine realistischere optische Darstellung zu erreichen. Da durch steigende Rechenleistung die Bildwiederholungsrate keinen limitierenden Faktor mehr darstellt, ist bereits ein entsprechender Trend festzustellen. Allerdings führt eine alleinige Verbesserung des Visualisierungssystems nicht grundsätzlich zu positiven Effekten. Andersen (2011) sowie Greenberg und Blommer (2011) berichten bei einem zu groß gewählten Field of View von Problemen mit Simulatorkrankheit, also auftretender Übelkeit und Desorientierung. Insbesondere ist der Effekt bei statischen Simulatoren festzustellen (Greenberg & Blommer, 2011). Ein möglicher Erklärungsansatz liegt darin begründet, dass die sehr gute Nachbildung visueller Informationen zu einer als real wahrgenommenen Umgebung führt, der Proband dann aber die Diskrepanz zu den fehlenden vestibulären Reizen nicht ausreichend verarbeiten kann.

2.3.4.2 Bewegungssysteme

Die Verwendung komplexer Bewegungssysteme ermöglicht es, Beschleunigungskräfte zu erzeugen und somit vestibuläre Reize im Fahrsimulator darzustellen. Übernommen aus der englischsprachigen Fachliteratur existiert dafür der Begriff des Motion Cueing (vgl. Fischer, 2009).

Ein weit verbreiteter Typ einer Bewegungsplattform ist der sogenannte Hexapod, eine Konstruktion, bei der der Fahrerplatz von sechs längenverstellbaren Zylindern getragen wird, vgl. Abbildung 2-12.

Durch diese Parallelkinematik ergeben sich drei rotatorische und drei translatorische Freiheitsgrade, das System ist also in allen Raumrichtungen frei beweglich. Erste technische Umsetzungen finden sich bei Gough und Whitehall (1962) sowie Stewart (1966). Deshalb wird diese Form der Bewegungsplattform nach seinen Erfindern häufig auch als Stewart- oder Stewart/Gough-

Plattform bezeichnet. Sollen dem Fahrer beim Beschleunigen, Bremsen oder während der Kurvenfahrt Beschleunigungskräfte vermittelt werden, ist das System zunächst in der Lage, diese durch eine translatorische Bewegung darzustellen.



Abbildung 2-12: Fahrsimulator mit Hexapod als typisches Beispiel einer Bewegungsplattform mit sechs Freiheitsgraden (Quelle: AUDI AG)

Der Bewegungsumfang und die damit erzielbaren Beschleunigungen sind allerdings bei dieser Konstruktion bauartbedingt relativ gering. Greenberg und Blommer (2011) verdeutlichen, dass für eine Beschleunigung auf 50 km/h mit durchschnittlich 2 m/s^2 eine lineare Verschiebung von 50 Metern notwendig wäre, um ein vergleichbares Beschleunigungsempfinden wie im Realfahrzeug zu erzeugen. Da dies nicht möglich ist, wird im Anschluss an die translatorische Bewegung eine Kippbewegung ausgeführt. Ein Teil der Erdbeschleunigung wird dadurch als Längs- oder Querschleunigung des Fahrzeugs wahrgenommen. Voraussetzung ist, dass dieser Vorgang mit einer Geschwindigkeit bzw. Drehrate erfolgt, die unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwelle liegt. Für den o.g. Beschleunigungsvorgang ist nach Greenberg und Blommer (2011) beispielsweise ein Kippen der Plattform um $11,5^\circ$ notwendig. Als Absolutangabe nennen Tomaske und Meywerk (2006) einen Wert von 25° , um unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwelle zu verbleiben. Mit Hilfe dieser Methode können dann auch länger andauernde Beschleunigungen vermittelt werden.

Zusätzlich zur vestibulären Information werden durch die Druckverlagerung im Fahrzeugsitz auch Reize für das somatosensorische System geschaffen. Abbildung 2-13 verdeutlicht die resultierenden Kräfte am Beispiel eines Beschleunigungsvorgangs.

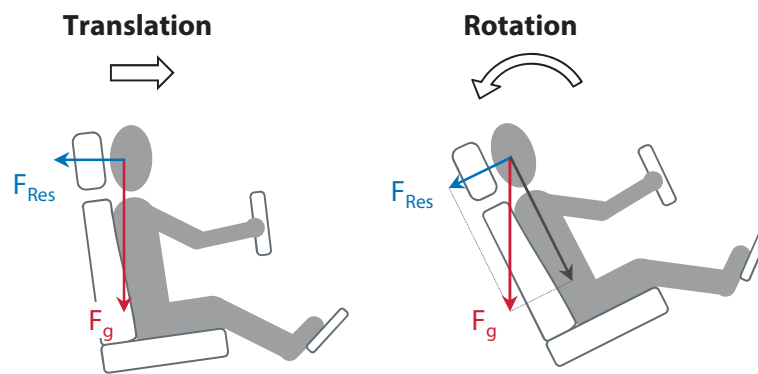


Abbildung 2-13: Translation: Entsprechend dem Realfahrzeug tritt eine resultierende Kraft in Folge der Längsbeschleunigung auf. Rotation: Anteil der Gewichtskraft wird als Längsbeschleunigung wahrgenommen.

Das Zurückziehen des Simulators in seine Ausgangsposition, um für folgende Beschleunigungsvorgänge den vollständigen Bewegungsspielraum zur Verfügung zu haben, wird als Wash-Out bezeichnet. Diese unnatürliche Gegenbewegung hat unbedingt unterhalb der Wahrnehmungsschwelle des Fahrers stattzufinden. Besonders zu berücksichtigen ist auch die Nichtlinearität der menschlichen Wahrnehmung, wie sie Stratulat, Roussarie, Vercher und Bourdin (2012) am Beispiel eines Brems- und Beschleunigungsvorgangs zeigen. Ihre Versuchsergebnisse belegen, dass eine rückwärtige Kippbewegung zur Darstellung von Beschleunigungen leichter wahrgenommen wird als eine Bewegung selben Umfangs nach vorne zur Darstellung einer Bremsung.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass bei herkömmlichen Stewart-Plattformen Beschleunigungsvorgänge für viele Fahrsituationen nicht in vollem Umfang darstellbar sind. Geeignete Methoden zur Skalierung sind deshalb Gegenstand aktueller Forschung, vgl. z.B. Jamson (2012); Fang und Kemeny (2012) oder Beghi, Bruschetta, Maran und Minen (2012). Zielsetzung ist hier, den Bewegungsspielraum durch prädiktive Algorithmen bestmöglich auszunutzen. Auch der Einsatz variabler Skalierungsfaktoren wird als zielführend gesehen, nach Stratulat et al. (2014) kann dadurch beispielsweise das Anfahren realitätsnäher gestaltet werden. Dennoch verbleibt bei einer Skalierung realer Beschleunigungen die bereits diskutierte Frage nach der Eignung zur Fahrdynamikentwicklung. Kostenintensive Lösungen sehen deshalb die Erweiterung der Stewart-Plattform um zusätzliche, redundante Freiheitsgrade vor. Insbesondere Schienensysteme, die eine Verschiebung der Bewegungsplattform in Längs- oder Querrichtung ermöglichen, sind hierfür geeignet (Fischer, Sehammer & Palmkvist, 2010; Van der Borch, Hoffmeyer & Thalen, 2012). Fischer et al. (2010) verweisen darauf, dass ein um eine Quer- und Längsschiene erweiterter Simulator mit acht Freiheitsgraden deutlich weniger Kippbewegungen ausführen muss, als dies bei einem Hexapod mit sechs Freiheitsgraden, also ohne Schienensystem, erforderlich



ist. Bei der Abbildung unskalierter Beschleunigungen müssten in diesem Fall hohe Neigungswinkel und -raten mit Spitzenwerten bis zu 30 °/s verwendet werden, die zumindest für das sensiblere Auflösungsvermögen von Testfahrern ungeeignet erscheinen (Fischer et al., 2010).

Im Bereich des Motorsports und der Fahrdynamikentwicklung wird verstärkt an Systemen mit redundantem Gierfreiheitsgrad, mit dem Ziel einer verbesserten Darstellung von Schwimmwinkeln, gearbeitet. Die Beschreibung eines aktuellen Systems findet sich beispielsweise bei McNally (2014). Als weiterer Vorteil redundanter Freiheitsgrade bietet sich die Möglichkeit frequenzselektiver Bewegungen an. So kann ein Teilsystem des Simulators hochfrequente, aber räumlich begrenzte Bewegungen ausführen, während das redundante System des Simulators auf größere, aber trägere Bewegungen in derselben Richtung spezialisiert ist.

Kostengünstigere Systeme verzichten dagegen meist auf die Darstellung aller räumlichen Freiheitsgrade und verwenden einfachere Bewegungsplattformen. Die Einschränkungen orientieren sich dabei am Haupteinsatzbereich. Beispielsweise wird für ein System mit Fokus auf Fahrerassistenzsysteme zur Längsführung die Nickbewegung beim Anfahren und Bremsen von besonderer Relevanz sein, während dem Wanken oder Gieren des Fahrzeugs nur eine sekundäre, evtl. verzichtbare Rolle zukommt. Eine zu gering ausgeprägte Bewegungsfähigkeit führt in der Regel aber zu verschlechterter Fahrzeugkontrolle und einer unrealistisch hohen Anforderung an das visuelle System des Menschen (Greenberg & Blommer, 2011).

Bei mangelnder Beschleunigungsfähigkeit des Systems kann auch eine als Offline-Motion-Cueing bezeichnete Methode angewandt werden (Granzow, 2012). Darunter versteht man die Vorausberechnung der erforderlichen Simulatorbewegungen. Möglich ist dies für alle Situationen, in denen der Simulatornutzer die Rolle des Beifahrers einnimmt und die Simulation nur passiv erlebt oder ein standardisiertes Fahrmanöver wie ein ISO-Spurwechseltest gefahren wird. Der Simulator kann bei bekanntem Streckenverlauf so vorkonditioniert werden, dass immer ein größtmöglicher Bewegungsspielraum zur Verfügung steht (Granzow, 2012). Bei einer freien Simulatorfahrt ohne Streckenvorgabe muss dagegen grundsätzlich auch für unerwartete Fahrer-eingaben die Möglichkeit einer entsprechenden Plattformbewegung vorgehalten werden, wodurch der nutzbare Bewegungsbereich geschmälert wird.

Für alle Varianten von Bewegungsplattformen gilt, dass zeitliche Verzögerungen zwischen der auszuführenden Bewegung und den anderen Komponenten des Simulationssystems, wie beispielsweise der Bilddarstellung, zu vermeiden sind. Nach Fang, Reymond und Kemeny (2010) gliedern sich diese in zwei typische Kategorien. Zum einen entstehen Transportverzögerungen zwischen der Fahrereingabe und der Signalverarbeitung durch die Datenübertragung und die Berechnung mittels der Simulationssoftware. Zum anderen tritt ein zusätzlicher Phasenverzug auf, der auf die Trägheit der ausführenden Stellmotoren der Plattformen zurückzuführen ist.



2.3.4.3 Weitere Systeme zur Vermittlung vestibulärer und somatosensorischer Reize

Zusätzlich zur Nutzung von Bewegungsplattformen, die überwiegend vestibuläre Reize erzeugen, kommt eine Vielzahl anderer Systeme zum Einsatz, die den Immersionsgrad der Simulation durch das Ansprechen weiterer Sinne steigern.

Im Fahrzeug treten durch den Antriebsstrang, die Beschaffenheit der Fahrbahn oder auch Windanregungen verschiedenartige Schwingungen auf, die unter dem Begriff NVH (Noise, Vibration, Harshness) zusammengefasst werden. Der Bereich der Rauigkeit (Harshness) erstreckt sich nach Heißing, Ersoy und Gies (2013b) von 20 bis 100 Hz und ist für den Fahrer durch Schwingungen am Sitz und am Lenkrad spürbar. Wesentlich dazu sind die in Kapitel 2.2.2.4 beschriebenen Mechanorezeptoren, durch Resonanzschwingungen im Fahrzeug kann je nach Frequenzspektrum aber auch eine akustische Wahrnehmung erfolgen. Zur Simulation der fahrbahnseitigen Anregungen existieren einerseits hochpräzise Streckenmodelle, die im Fahrdynamikmodell eine realistische Berechnung des Kontakts zwischen Reifen und Fahrbahn ermöglichen (Bolling et al., 2010). Andererseits werden hardwareseitig Shaker-Systeme an der Lenksäule oder den Sitzschienen genutzt, um dem Fahrer die Schwingungen zu vermitteln (Berberich, Gebhard, Bohlen, Danninger & Lienkamp, 2013).

Zur Steigerung des Komfortempfindens bieten Fahrzeuge der Oberklasse die Möglichkeit, den Seitenhalt im Sitz durch eine variable Anpassung der Sitzseitenwangen an den Streckenverlauf zu verbessern (Ludewig, 2012). Auch im Fahrsimulator ist eine Nutzung denkbar, um die Wirkung der Fliehkräfte mittels einer Druckerzeugung in der kurvenäußeren Seitenwange darzustellen. Den Realitätsgrad von Bremsungen, vor allem in statischen Simulatoren, können aktiv gesteuerte Sicherheitsgurte verbessern (Groot, Winter, Mulder & Wieringa, 2011). Bei Auftreten einer höheren negativen Beschleunigung wird der Sicherheitsgurt durch einen Stellmotor angespannt und der Fahrer in den Sitz gezogen, genauso wie dies durch den Gurtstraffer im Realfahrzeug der Fall wäre.

Im Bereich der Rennsportsimulation existieren Systeme, bei denen der Helm des Fahrers mit einer Vorrichtung verbunden ist, die, entsprechend der Stärke der zu simulierenden Beschleunigung, den Helm des Fahrers in die jeweilige Richtung zieht. Das Schieflegen des Kopfes und die damit verbundene Anspannung der Nackenmuskulatur suggerieren hier dem propriozeptiven System das Auftreten von Beschleunigungen. Die Methode der Galvanischen Vestibulären Stimulation bietet die direkte Möglichkeit der Beschleunigungsdarstellung durch Beeinflussung des vestibulären Systems. Eine ausführliche Erklärung dieser Technologie folgt in der Versuchsbeschreibung in Kapitel 6.



Bock (2008) verfolgt mit dem Vehicle in the Loop (kurz: VIL) einen Ansatz zwischen virtueller und simulierter Versuchsumgebung. Dabei wird ein reales Fahrzeug auf ausreichend freier Fläche bzw. Fahrbahn mit einem Head-Mounted-Display kombiniert. Der Fahrer nimmt dadurch visuell die virtuelle Umgebung wahr, während alle anderen Sinnessysteme die unverfälschten Reize des Realfahrzeugs aufnehmen (Berg & Färber, 2015). Dieses Vorgehen ermöglicht beispielsweise die Erprobung von Fahrerassistenzsystemen in besonders kritischen Verkehrssituationen, da diese nur in der virtuellen Umgebung vorliegen.

2.3.4.4 Soundsysteme

Im Fahrzeug auftretende Geräusche lassen sich im Wesentlichen den vier Quellen der Verkehrsteilnehmer, des Winds, des eigenen Antriebsstrangs mit Motor und Getriebe sowie dem Abrollen der Reifen auf der Fahrbahn zuordnen, vgl. Tabelle 2-2. Auch bei der Soundsimulation definieren der Anwendungsfall und die Nutzergruppe den benötigten Realitätsgrad, beispielsweise hinsichtlich der Verortung der Geräuschquelle oder des Frequenzspektrums. Nach Greenberg und Blommer (2011) wird bei der NVH-Simulation mit hoch präzisen dreidimensionalen Soundmodellen gearbeitet, während in vielen anderen Simulatoren nur ein geschwindigkeits- oder drehzahlabhängiges Motorengeräusch wiedergegeben wird.

Mangels ausreichender Forschungsergebnisse können nach Jamson (2011) keine allgemeingültigen Aussagen zum Einfluss der Sounddarstellung auf das Fahrerverhalten getroffen werden. Scholz (2003) konnte in einer virtuellen Umgebung für den Bereich der Geschwindigkeitswahrnehmung nachweisen, dass zur akustischen Differenzierung ein Unterschied von 26 % der Fahrgeschwindigkeit benötigt wird, dagegen bei rein visueller Unterscheidung ein Wert von 18 % ausreicht. Da bei Kombination beider Sinnessysteme keine Verbesserung im Vergleich zur rein visuellen Differenzierung erzielt werden konnte, ist nach Scholz (2003) die Bedeutung des auditorischen Sinnessystems als gering einzuschätzen. Jamson (2011) verweist darauf, dass auch im Realfahrzeug der Einfluss der Fahrgeräusche zurückgeht, da in modernen Fahrzeugen das Geräuschniveau durch Dämmmaßnahmen äußerst gering ist.

Als positiver Einfluss der Geräuschkulisse im Fahrsimulator kann aber die Maskierung von Störgeräuschen, wie sie beispielsweise durch die Bewegungsplattform entstehen, gesehen werden (Jamson, 2011). Aus diesem Grund werden auch Kopfhörersysteme eingesetzt, während ansonsten Mehrkanal-Soundsysteme mit Lautsprechern innerhalb oder außerhalb des Mockup genutzt werden. Bei der Verwendung von Lautsprechern tritt zusätzlich die Schwierigkeit auf, das akustische Feld im Fahrzeuginnenraum mit in die Berechnung der Sounddarstellung einzubeziehen (Greenberg & Blommer, 2011).

Weiterhin muss bei der Gestaltung von Soundsystemen auf die Interaktion mit anderen Stimuli geachtet werden. Skoda, Steffens und Becker-Schweitzer (2012) konnten nachweisen, dass Fahrgeräusche in einem dynamischen Simulator leiser erscheinen, als dies in einem statischen Simulator, also ohne vestibuläre Reize, der Fall ist. Dieses Ergebnis wird mit der Verlagerung der begrenzten Aufmerksamkeitsressourcen begründet.

2.4 Bewertung von Fahrverhalten

Wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, werden bei der Entwicklung im Bereich der Fahrdynamik gleichermaßen objektive und subjektive Bewertungsverfahren zur Entscheidungsfindung angewandt. Abbildung 2-14 zeigt die Entscheidungspfade für die virtuelle, auf Simulationsmodellen beruhende Entwicklung und die herkömmliche Herangehensweise mit dem Einsatz von Prototypen- und Technikträgerfahrzeugen. Angedeutet ist dabei auch der Vorteil der virtuellen Verfahren, welche bereits in einem früheren Stadium des Entwicklungsprozesses genutzt werden können. Eine Kombination aus subjektiver und objektiver Methodik bilden Objektivierungsverfahren, die in Kapitel 2.4.3 erklärt werden.

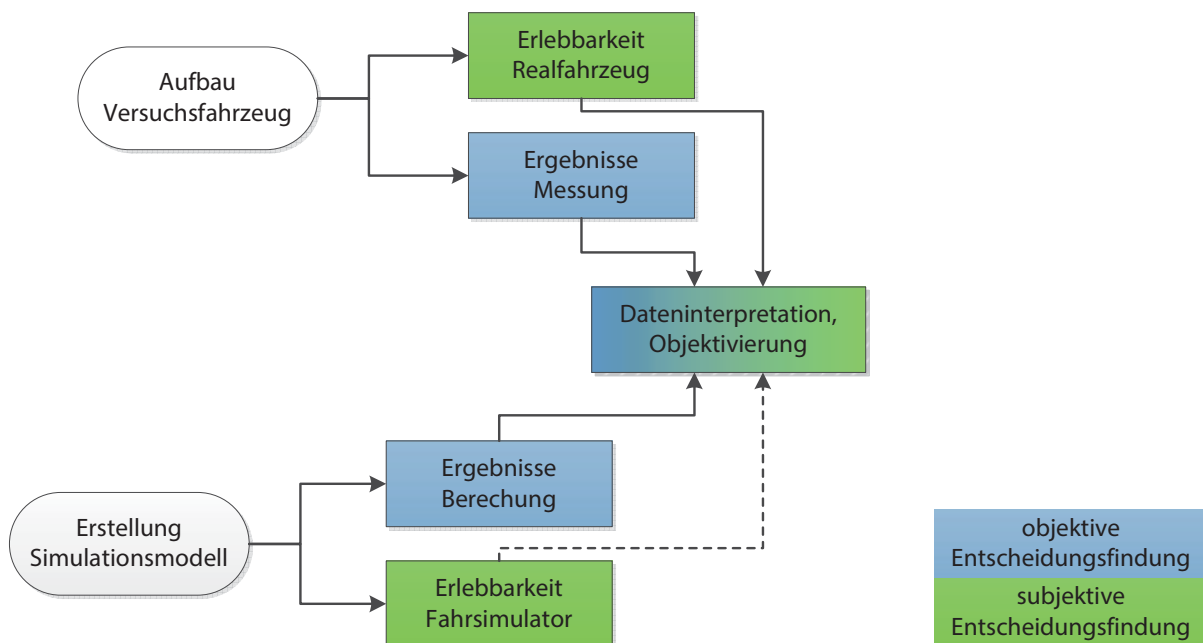


Abbildung 2-14: Möglichkeiten der objektiven und subjektiven Entscheidungsfindung zur Entwicklung von Fahrdynamikeigenschaften

Bisher werden subjektive Bewertungen, die in virtuellen Umgebungen wie einem Fahrsimulator getroffen werden, nur bedingt zur Gestaltung fahrdynamischer Eigenschaften eines Fahrzeugs herangezogen. Aus heutiger Sicht überwiegt hier das Subjektivurteil im Realfahrzeug.



2.4.1 Verfahren zur objektiven Beurteilung von Fahrverhalten

Bei Messungen im Realfahrzeug handelt es sich überwiegend um Open-Loop-Fahrmanöver⁵, also Szenarien, in denen kein menschlicher Regeleingriff erfolgt. Automatisierte Fahrzeugbewegungen, beispielsweise durch Lenkroboter mit anschließender Messung der Fahrzeugreaktion ermöglichen Aussagen, die neben ihrer Objektivität vor allem auch durch hohe Reliabilität gekennzeichnet sind (Pfeffer & Harrer, 2011). Die Manöver wie auch die physikalischen Messwerte sind standardisiert und bieten so auch über Baureihen oder Vorgängerfahrzeuge hinweg die Möglichkeit eines Vergleichs. Auch Closed-Loop-Fahrmanöver, die den Fahrer zur Vervollständigung des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises voraussetzen, können zur Gewinnung objektiver Daten genutzt werden. Der individuelle Einfluss des jeweiligen Fahrers schränkt die Vergleichbarkeit der Werte allerdings ein. Typischerweise wird der Grad der Erfüllung der Fahraufgabe mittels der Erhebung von Messwerten am Fahrzeug bestimmt. Eine Messung von Größen der menschlichen Informationsverarbeitung, wie beispielsweise die Bestimmung der Beanspruchung bei Fahrerinformations- oder Fahrerassistenzsystemen, findet in der Regel nicht statt.

Im Umfeld der Fahrdynamikberechnung wird mit Mehrkörper-Simulationsmodellen (MKS) das Fahrverhalten des Fahrzeugs abgebildet. Basierend auf diesen Modellen können in nachgelagerten Softwaretools die einschlägigen Fahrmanöver simuliert werden (Widmann, 2013). Die so erzeugten Werte bilden die Datenbasis für den Abgleich mit Messfahrten im Fahrzeug. Neben Open-Loop-Manövern können mittels eines Fahrermodells auch Closed-Loop-Manöver in der Simulation umgesetzt werden (Widmann, 2013). Dazu wird das Verhalten des menschlichen Fahrers im Realfahrzeug in Form eines regelungstechnischen Algorithmus abgebildet.

2.4.2 Verfahren zur subjektiven Beurteilung von Fahrverhalten

Die Subjektivbeurteilung mit professionellen Testfahrern bildet neben objektiven Ergebnissen aus Messung oder Berechnung weiterhin eine wesentliche, da menschliche Einschätzung zum Fahrgefühl eines Fahrzeugs. Die Spannweite reicht vom Erleben von Open-Loop Manövern in der Beifahrersituation über Closed-Loop-Manöver bis hin zur freien Testfahrt auf geeigneten Strecken.

Abbildung 2-15 zeigt das im industriellen Kontext zur Evaluation gängige Vorgehen nach Heißing und Brandl (2002). Zunächst wird entschieden, ob das Fahrzeug dem momentanen Indust-

⁵ Allgemein steht Open-Loop für die englischsprachige Bezeichnung eines offenen Regelkreislaufs und entspricht dem technischen Begriff der Steuerung. Closed-Loop ist die Bezeichnung eines geschlossenen Regelkreislaufs und entspricht dem technischen Begriff der Regelung.



riestandard entspricht, anschließend wird eine Bewertung vergeben. Zur weiteren Differenzierung ist ein zehnstufiger Bewertungsindex (BI) üblich, der auch die Vergabe von halben Punkten vorsieht.

	Unterscheidung	Bewertung	BI	
Start der Evaluation	Fahrzeug entspricht Industriestandard	herausragend	10	9,5
		exzellent	9	8,5
		sehr gut	8	7,5
		gut	7	6,5
		befriedigend	6	5,5
		gerade ausreichend	5	
	Fahrzeug unter Industriestandard	ungenügend	4	
		Kundenbeschwerde	3	
		Liegenbleiber	2	
		Sicherheitsrisiko	1	

Abbildung 2-15: Bewertungsschema zur Subjektivbeurteilung nach Heißing und Brandl (2002)

Im Bereich der Fahrsimulation kann die in Kapitel 2.3.4.2 angesprochene Methode des Offline-Motion-Cueing, die einer Bewertung aus Beifahrersituation entspricht, ebenfalls eine Subjektivbeurteilung von Open-Loop-Manövern ermöglichen.

2.4.3 Objektivierungsverfahren

Mittels Objektivierungsverfahren werden subjektive Einschätzungen von Testfahrern und objektive Mess- und Berechnungsergebnisse in Zusammenhang gebracht. Zum Abgleich dienen Korrelations- und Regressionsverfahren (Pfeffer & Harrer, 2011). Schimmel (2010) unterscheidet drei Varianten der Objektivierung:

- Kennwertbasierte Objektivierung beschreibt das gängigste Verfahren, bei welchem aus Open-Loop-Manövern objektive Kennwerte gewonnen werden. Dafür werden beispielsweise Fahrten mit Lenkrobotern durchgeführt, bei denen die Reaktion des Fahrzeugs auf die automatisierten Lenkeingaben erfasst wird. Die daraus resultierenden Daten werden anschließend zu Subjektivbewertungen einer Beurteilungsfahrt in Bezug gesetzt.
- Fahrzeugmodellbasierte Objektivierung bedeutet eine Kombination des kennwertbasierten Ansatzes mit Berechnungsergebnissen. Zunächst werden dazu Messdaten aus



Realversuchen genutzt, um das Berechnungsmodell zu parametrieren. Nach der Durchführung der Berechnung kann eine Korrelationsanalyse zwischen diesen objektiven Ergebnissen und den Subjektivurteilen erfolgen.

- Fahrermodellbasierte Objektivierung bezeichnet ein Vorgehen, bei dem der Mensch als regelungstechnisches Modell abgebildet wird. Mittels physiologischer und psychologischer Erkenntnisse, wie den menschlichen Wahrnehmungsgrenzen oder Reiz-Reaktions-Mechanismen, werden die relevanten Sinnessysteme nachgebildet. Die menschliche Reaktion bei Fahraufgaben kann anschließend als Teil eines Softwaremodells berechnet werden. Letztlich können diese Ergebnisse wieder mit Subjektivurteilen verglichen werden.

Tomaske und Meywerk (2006) empfehlen für die Gewinnung der in allen drei Fällen benötigten Subjektivurteile auch den Einsatz eines Fahrsimulators. Das in dieser Veröffentlichung erwähnte System ist mit acht räumlichen Freiheitsgraden allerdings zur Klasse der kostenintensiven High-End-Simulatoren zu zählen.



Kapitel 3

Forschungsansatz und Vorgehensweise

Im folgenden Kapitel wird auf Basis der in Kapitel 2 erläuterten thematischen Grundlagen der Forschungsansatz der Arbeit spezifiziert. Es erfolgt eine Abgrenzung zu vergleichbaren Fragestellungen und die Ableitung der Vorgehensweise.

3.1 Spezifizierung des Forschungsansatzes

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Validierung der Erlebbarkeit von Fahrverhalten in Fahrsimulatoren. Zentraler Aspekt ist die Bewertung der Technologie der Fahrsimulation und der damit verbundenen Methoden hinsichtlich der Eignung, in der frühen Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses grundsätzliche Ausprägungen des Fahrverhaltens eines Fahrzeugs darzustellen und damit eine Beurteilung zu ermöglichen.



3.1.1 Fokussierung auf Fahrdynamik in Fahrsimulatoren

Wie eingangs in Kapitel 1 sowie in Kapitel 2.4 weiter beschrieben, ist die rechnergestützte Simulation des Fahrverhaltens und die damit einhergehende Erzeugung objektiver Daten fester Bestandteil bereits in der Konzeptphase eines Fahrzeugprojekts. Im Anschluss wird zur Plausibilisierung dieser Daten zumeist der Realversuch mit Versuchs- oder Prototypenfahrzeugen herangezogen (Ehlers & Breitling, 2013). Fahrsimulation besitzt das Potential, einerseits zur Kostenreduktion, andererseits zur Erhöhung der Entwicklungsgeschwindigkeit und Prognosegüte bereits in der frühen Projektphase beizutragen. Ohne dabei auf Realfahrzeuge zurückgreifen zu müssen, ist der Vorteil der subjektiven Meinungsbildung durch eine Testfahrt gegeben.

Dem Fahrverhalten von Fahrzeugen kommt eine zentrale Rolle in der oftmals stark subjektiv und emotional geprägten Kundenwahrnehmung zu, da die fahrdynamischen Eigenschaften beim Beschleunigen, Bremsen und Lenken über verschiedene menschliche Sinnessysteme wahrnehmbar und damit direkt erlebbar sind. Das Fahrverhalten unterstützt somit neben dem Design die Markenabgrenzung und Qualitätserkennung und bildet ein wesentliches Kaufkriterium (Graf, 2014). Wie in Kapitel 2.1 beschrieben wird, ist das Fahrverhalten des Fahrzeugs auch im Regelkreis zwischen Fahrer und Fahrzeug von großer Bedeutung, beispielsweise bei der Beherrschbarkeit kritischer Fahrsituationen.

Dennoch steht zum heutigen Zeitpunkt die virtuelle Entwicklung von Fahrverhalten in Fahrsimulatoren im Vergleich zu Anwendungen wie der Absicherung von Fahrerassistenzsystemen oder Bedienkonzepten zurück. Hintergrund ist die in Kapitel 2.3 angesprochene Herausforderung, vestibuläre und somatosensorische Reize physikalisch und zeitlich korrekt im Fahrsimulator abzubilden und Fahrerverhalten in dieser Umgebung erklären zu können. Neuere Studien zur ESC-Abstimmung⁶, beispielsweise Denoual, Mars, Petiot und Kemeny (2012) oder Fang et al. (2012), zeigen aber, dass der technologische Reifegrad bereits ausreicht, um auch Fragestellungen der Stabilisierungsebene zu bearbeiten.

Zusammenfassend lässt sich die Bedeutung der virtuellen Entwicklung für den Fahrzeughersteller und der fahrdynamischen Fahrzeugeigenschaften für den Kunden festhalten. Dies begründet die Fokussierung der Arbeit auf die Technologie der Fahrsimulation mit dem Anwendungsspektrum des Fahrverhaltens. Neben der technologischen Weiterentwicklung von Fahrsimulatoren besteht bei dieser Themenkombination Forschungsbedarf hinsichtlich der

⁶ ESC, kurz für *Electronic Stability Control*, bezeichnet ein Fahrdynamik-Regelsystem, das durch gezielte Brems- eingriffe Schleuderbewegungen eines Fahrzeugs in Form von Über- oder Untersteuern verhindern kann.



Übertragbarkeit und der Validität von Simulatorstudien in Bezug auf Fahrerverhalten und Beurteilungsqualität. Dies wird im nächsten Unterkapitel weiter ausgeführt.

3.1.2 Fahrerverhalten und Beurteilungsqualität als Validierungsbasis

Voraussetzung für den Ersatz realer Prototypen- und Versuchsfahrzeuge durch einen Fahrsimulator ist die Kenntnis der Unterschiede zwischen dem Erleben einer Fahrzeugeigenschaft in einer simulierten und einer realen Versuchsumgebung.

Für die Auslegung von Fahrzeugeigenschaften des Fahrverhaltens in einer virtuellen Versuchsumgebung sind die nachfolgenden Aspekte zu analysieren und zu validieren, die unter den Begriffen des Fahrerverhaltens und der Beurteilungsqualität zusammengefasst werden:

- **Fahrerverhalten:** Bei selber Fahrsituation bzw. Aufgabenstellung in Simulator und Realfahrzeug müssen vergleichbare Regeltätigkeiten des Fahrers in den verschiedenen Ebenen der Fahrzeugführung auftreten. Grundsätzlich unterschiedliche Lösungsansätze der Fahraufgabe sind auszuschließen, da die Übertragbarkeit zwischen realer und virtueller Versuchsumgebung nicht gegeben wäre. Bei ähnlicher Fahrstrategie müssen die Abweichungen quantitativ beschreibbar sein.
- **Beurteilungsqualität:** Beurteilungen der Fahrzeugeigenschaften im Simulator müssen in vergleichbarer Qualität zum Realfahrzeug getroffen werden. Sofern die Beurteilungsaufgabe eine eindeutige Entscheidung ermöglicht, wie beim Differenzieren zwischen zwei Varianten, ist das wesentlichste Kriterium zunächst eine korrekte Bewertung. Weiterhin sollten verschiedene Beurteiler oder auch dieselbe Person im Wiederholungsfall zu einem übereinstimmenden Ergebnis kommen. Für das Gesamtergebnis sind demnach zusätzlich kleine Streuungen als Qualitätsmerkmal zu fordern.

Weniger eindeutig, aber nicht minder wichtig, ist das Vertrauen des Beurteilenden in seine eigene Entscheidung. Gerade im industriellen Kontext werden anstelle eines ausreichend bemessenen Probandenkollektivs oftmals wenige Expertenurteile herangezogen. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, dass der jeweilige Experte auch selbst davon überzeugt ist, fehlerfrei und präzise beurteilen zu können und keine Zweifel aufgrund der Versuchsumgebung vorliegen.

Soweit bei beiden Punkten, dem Fahrerverhalten und der Beurteilungsqualität, eine Rückführung der Ergebnisse auf reale Fahr- und Beurteilungssituationen gesichert ist, kann von „valider Erlebbarkeit“ der virtuellen Versuchsumgebung gesprochen werden.

3.1.3 Ableitung übergreifender Fragestellungen

Ausgehend von dem Ziel, für die Simulationsumgebung eines Fahrsimulators die Erlebbarkeit von Fahrverhalten nachzuweisen, werden im Rahmen dieser Arbeit Fahr- und Beurteilungsaufgaben analysiert. Die Validierung erfolgt mittels der beiden angesprochenen Aspekte, dem Fahrerverhalten bzw. der Beurteilungsqualität. Das Vorgehen zielt darauf ab, Aussagen treffen zu können, in welcher Form und welchem Ausmaß eine geeignete Darstellung der notwendigen Reize hinsichtlich der menschlichen Wahrnehmung in der Simulation zu erfolgen hat.

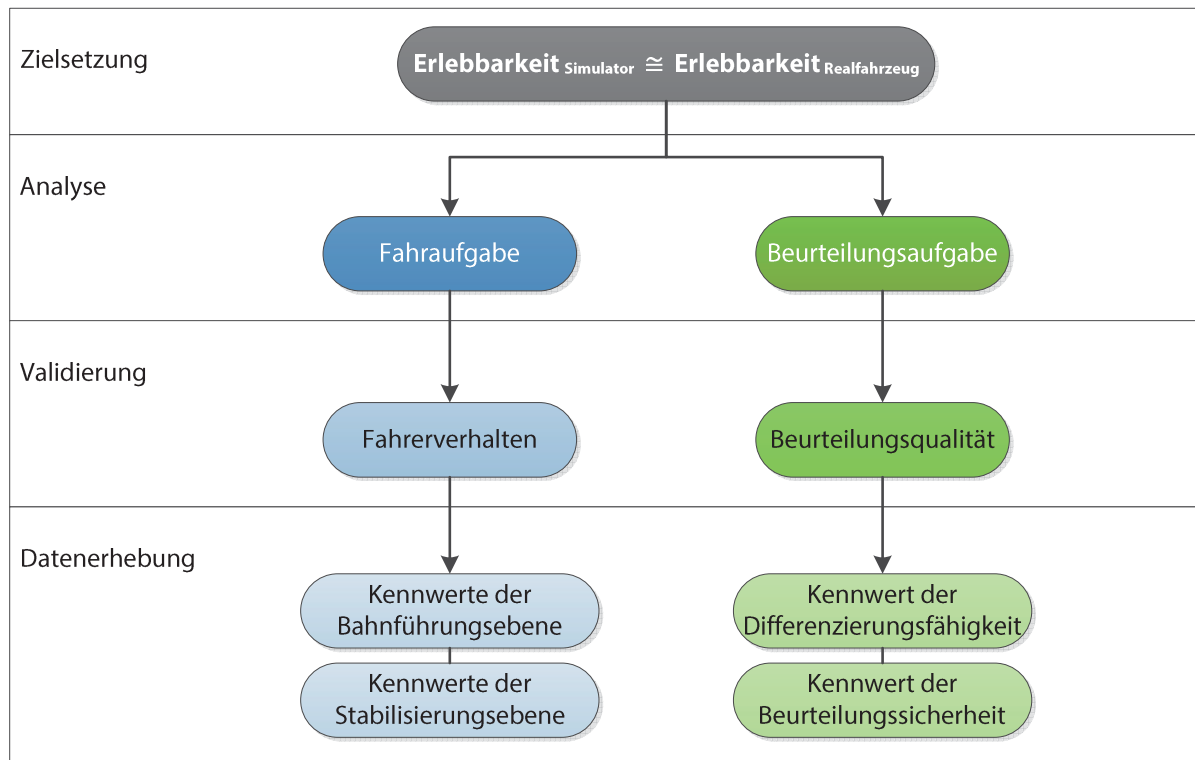


Abbildung 3-1: Schematisches Vorgehen zur Prüfung der Erlebbarkeit in Fahrsimulatoren. Bei Fahr- und Beurteilungsaufgaben wird das Fahrerverhalten bzw. die Beurteilungsqualität validiert. Die dazu erhobenen Kennwerte werden in Kapitel 3.4 beschrieben.

Bezüglich des Fahrerverhaltens sind objektive Kennwerte zu erheben. Der Schwerpunkt wird dabei auf fahrdynamische Kennwerte, die am Fahrzeug bzw. Simulator zu erfassen sind, und auf Nachführgrößen im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis gelegt. Ebenfalls von Bedeutung ist die Erfassung der Informationsumsetzung in Form der direkt messbaren Regeleingriffe des Fahrers. Betrachtet werden dazu sowohl Kennwerte auf Stabilisierungs- als auch auf Bahnführungsebene.

Als übergreifende Fragestellungen sind die folgenden Punkte zum Fahrerverhalten zu klären:

- Der Grad der Erlebbarkeit hat Einfluss auf die Realitätstreue des Fahrerverhaltens.



- Der Grad der Erlebbarkeit wirkt sich in den verschiedenen Ebenen der Fahrzeugführung unterschiedlich auf das Fahrerverhalten aus.

Bei den Beurteilungsaufgaben sind die beiden zuvor erläuterten Kriterien für die Qualität einer Beurteilung abzusichern. Zum einen muss eine korrekte und präzise Entscheidung ermöglicht werden. Zum anderen muss auch aus der Sicht des Bewertenden das Vertrauen in die eigene Entscheidung gewährleistet sein. Bei der Nachbildung realer Gegebenheiten in einer Simulationsumgebung stellt sich dazu ebenfalls die Frage, welche Informationen und Reize zur Verfügung stehen müssen, um Fahrverhalten beurteilen zu können.

Hinsichtlich der Beurteilungsqualität erfolgt deshalb die Erarbeitung der wie folgt beschriebenen Thesen:

- Der Grad der Erlebbarkeit hat Einfluss auf das Erkennen und Beurteilen von Fahrzeugeigenschaften aus dem Bereich des Fahrverhaltens.
- Der Grad der Erlebbarkeit hat Einfluss auf die subjektiv empfundene Sicherheit bei der Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften aus dem Bereich des Fahrverhaltens.

Die weitere Detaillierung in Form von Versuchshypothesen, jeweils mit der Definition einer Nullhypothese (H_0) und der zugehörigen Alternativhypothese (H_1), erfolgt im Rahmen der Beschreibung der Probandenstudien in den entsprechenden Kapiteln. Die verwendeten objektiven und subjektiven Messgrößen werden in Kapitel 3.4 eingeführt.

3.2 Präzisierung des Forschungsansatzes

Der im vorangegangenen Kapitel erklärte Ansatz beschreibt ein größeres Forschungsfeld. Die vorliegende Arbeit trifft für das weitere Vorgehen deshalb Eingrenzungen hinsichtlich der Nutzergruppen, der Aufgabenstellung und Bewertungsmethodik sowie der Simulatortechnologie.

3.2.1 Definition der Nutzergruppe

Als Zielgruppen für den Einsatz eines Simulators lassen sich im Entwicklungsprozess im Wesentlichen zwei Personenkreise unterscheiden. Als Erstes ist dies eine homogene Gruppe von fachlichen Experten, die auf Basis von Erfahrung und vertieften, eigenschaftsspezifischen Kenntnissen die Kompetenz besitzen, Entscheidungen mit geringen individuellen Unterschieden zu treffen. Die Bewertung der Ausprägung einer Fahrzeugeigenschaft wie auch die Parametrierung bzw. Feinabstimmung in einer späteren Entwicklungsphase können so von einem relativ kleinen Personenkreis durchgeführt werden (Schimmel, 2010). Probandenstudien, mit



einem nach inferenzstatistischen Methoden bestimmten Probandenkollektiv, wie sie beispielsweise bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen oder des Fahrzeuginnenraums durchgeführt werden, sind im Prozess der Fahrdynamikauslegung bisher wenig etabliert. Die zweite Zielgruppe besteht aus fachübergreifenden Entwicklern und dem Management, die allgemeines, fahrzeugbezogenes Wissen, aber keine Fertigkeiten in der vertieften Ausprägung der Experten besitzen. Sie lassen sich zum Kreis der technisch versierten Normalfahrer zusammenfassen, die in der Entwicklungsphase die Sicht eines anspruchsvollen Kunden vertreten. Neben dem Expertenurteil ist auch diese zweite Sichtweise im frühen Projektstadium unverzichtbar, um die Kundenrelevanz einer Eigenschaftsausprägung bereits zu diesem Zeitpunkt prüfen zu können. Besonders wichtig für diesen Personenkreis ist das direkte Erleben einer Fahrzeugeigenschaft. Der Experte hingegen kann auf Basis seines fachlichen Wissens mit wenigen, abstrakten Informationen eine Beurteilung treffen. Für die zweite Gruppe der technisch versierten Normalfahrer besteht ein Bedarf an Methoden, die einen anschaulichen, subjektiv geprägten Zugang ermöglichen.

In dieser Arbeit soll Fahrsimulation als Technologie und Methode für die Darstellung kundenrelevanten Fahrverhaltens in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses geprüft werden. Zur weiteren Präzisierung des Forschungsansatzes beschränkt sich diese Arbeit deshalb überwiegend auf technisch versierte Normalfahrer. Die Fahraufgaben sind dabei unspezifisch zu wählen und sollen den für den Kunden bewusst erlebbaren Bereich der Fahrdynamik darstellen. In Bezug auf die Belastung bzw. Beanspruchung durch die Fahraufgabe ist somit auch zu fordern, dass ausreichend kognitive Ressourcen hinsichtlich der Beurteilungsfähigkeit verbleiben (Krüger, Neukum & Schuller, 1999). Der zweite, hier nicht weiterverfolgte Ansatz wäre, Fahrsimulation als Entwicklungsunterstützung für die Gruppe der Experten zu untersuchen. Voraussetzung dazu ist, Testfahrer als Probandengruppe zur Überprüfung der Technologie einzusetzen. Als Fahraufgaben müssten standardisierte Fahrmanöver im Open- und Closed-Loop herangezogen werden, die sich auf spezielle Prüfkriterien beziehen.

Eine wesentliche Herausforderung der gewählten Herangehensweise bilden das heterogene Fahrerverhalten und die Beurteilungsqualität. Die individuelle Interpretation und Lösung einer Fahraufgabe kann deren quantitative Betrachtung verhindern, da interindividuelle Differenzen den eigentlichen Versuchseffekt überlagern. Auch die Subjektivbewertung des Fahrverhaltens des Fahrzeugs unterliegt durch individuelle Unterschiede in der Wahrnehmung einer starken Streuung. Einschätzungen der Personengruppe der Normalfahrer sind als vergleichsweise unpräziser zu erwarten, da zum Treffen eines Quasi-Objektivurteils wie dem eines Fachexperten die Expertise nicht ausreichend ist (Stickel, 2006). Gleichzeitig bietet die Quantifizierung dieser Probleme aber auch das Potential, Unterschiede zwischen der Fahrsimulation und Erprobungsfahrten im Realfahrzeug zu identifizieren. Abweichende Effekt- und Teststärken bzw. die Größe



einer Probandengruppe, um statistisch gesicherte Aussagen zu erzielen, sind hierfür ein Beispiel.

3.2.2 Aufgabenspektrum Fahrdynamikeigenschaften

Bei der Betrachtung des Themenkomplexes der Fahrdynamik soll dagegen keine Eingrenzung erfolgen. Zielsetzung ist ein ganzheitlicher Ansatz, der bezüglich der Fahrzeugführung die kundenrelevanten Bereiche der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik gleichermaßen betrachtet (vgl. Wiedemann, Remlinger & Bengler, 2014b). Dabei kann keine vollständige Analyse auf Detailebene umgesetzt werden. Zum einen folgt dieser Schluss aufgrund des Umfangs dieser Themengebiete, zum anderen aber auch, da bei hohem Detaillierungsgrad spezifische Fahrmanöver und somit eine weitreichendere Expertise der Nutzer erforderlich ist. Stattdessen sollen anhand grundlegender fahrdynamischer Fragestellungen Aussagen getroffen werden, die exemplarisch und auf vergleichbare Problemstellungen übertragbar sind.

3.2.3 Bewertung anhand der Informationsumsetzung

Die Bewertung der Fahr- und Beurteilungsaufgaben setzt beim Prozess der Informationsumsetzung ein, indem die Reaktionen des Fahrers erfasst werden. Eine Analyse der menschlichen Informationsverarbeitung erfolgt im Sinne einer Blackbox-Betrachtung nicht. Hierzu wäre eine Modellierung der Übertragungsfunktion zwischen Simulator und den relevanten menschlichen Sinnessystemen notwendig. Die Methodik zur Erstellung eines solchen kybernetischen Fahrermodells erläutern Boer, Jamson, Advani und Horrobin (2014) am Beispiel der Fahraufgabe eines Spurwechseltests. Neben den objektiven Daten zum Fahrerverhalten wird bei diesem Forschungsansatz zusätzlich der zeitliche Verlauf der Lenkregeltätigkeiten in eine Metrik überführt, um daraus anschließend eine Übertragungsfunktion zu entwickeln.

3.2.4 Eingesetzte Simulatortechnologie

Die Spezifikation der Nutzergruppe und der Fahrscenarien wirkt sich auch auf die Wahl der Simulatortechnologie aus. Die Lösung der Fahraufgabe erfordert nur in Ausnahmefällen die Ausnutzung des physikalischen Grenzbereichs des Fahrzeugs. Deshalb ist zu hinterfragen, ob der volle Umfang der technischen Möglichkeiten der Fahrsimulation Anwendung finden muss. Vielmehr ist die Zielsetzung zu analysieren, welche quantitativen und qualitativen Merkmalsausprägungen ein Fahrsimulator besitzen sollte, um für das Spektrum des kundenrelevanten Fahrverhaltens ein ausreichend realitätsnahes Fahrerverhalten und Beurteilen zu ermöglichen.

Damit ist eine klare Abgrenzung zu Forschungsarbeiten zu ziehen, deren Entwicklungsziel eine kostenintensive Individuallösung für eine spezifische Fragestellung bzw. Fahrzeugeigenschaft darstellt.

3.3 Experimentelle Umsetzung der Fragestellungen in Probandenstudien

Aus den vorhergehenden Kapiteln kann zusammengefasst werden, dass diese Arbeit folgende Annahmen bzw. Spezifizierungen trifft:

- Die Analyse der Erlebbarkeit wird anhand subjektiver Daten zur Beurteilungsqualität sowie objektiver Daten zum Fahrerverhalten durchgeführt.
- Bei der betrachteten Personengruppe handelt es sich vorwiegend um technisch versierte Normalfahrer, welche die Kundensicht im Entwicklungsprozess vertreten.
- Die Fahrsituationen und die zu bewertenden Fahrdynamikeigenschaften sind kundenrelevant und repräsentativ für übergreifende Themengebiete des Fahrverhaltens.

Die Schritte des experimentellen Vorgehens sind in Abbildung 3-2 dargestellt und werden im folgenden Abschnitt weiter ausgeführt.

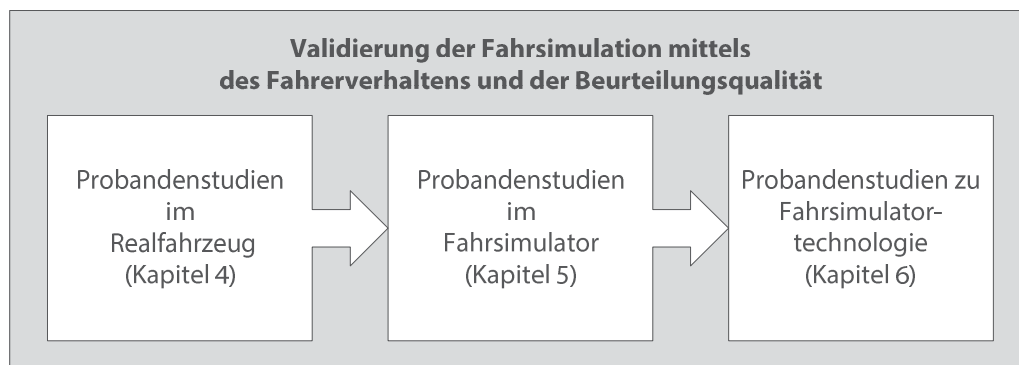


Abbildung 3-2: Schematisches Vorgehen im Rahmen der Arbeit

3.3.1 Probandenstudien im Realfahrzeug

Zunächst ist eine Betrachtung von Fahr- und Beurteilungsaufgaben im Realfahrzeug notwendig. Das Fahrerverhalten und die Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften liegen hier in unverfälschter Form vor, da keine unbeabsichtigte Beeinträchtigung der menschlichen Wahrnehmung durch Fehldarstellungen, wie gegebenenfalls im Simulator möglich, erfolgt. Zur Analyse der Bedeutung einzelner Sinne für die Erfüllung der Fahraufgabe oder die Bewertungsleistung bietet sich dadurch die Möglichkeit eines subtraktiven Vorgehens. Darunter ist zu verstehen, dass die



Wahrnehmung des Fahrers schrittweise und somit quantifizierbar eingeschränkt wird. So lässt sich der Effekt der Veränderung messen, ohne Störeinflüsse und Quereffekte durch andere, fehlbeeinflusste Wahrnehmungskanäle berücksichtigen zu müssen.

3.3.2 Probandenstudien im Fahrsimulator

Aufbauend auf den Ergebnissen der Realfahrzeugstudien setzen sich die weiteren Versuchsreihen direkt mit der Fahrsimulation auseinander. Je nach eingesetzter Technologie des Simulators werden die verschiedenen Sinneskanäle des Menschen qualitativ und quantitativ unterschiedlich gut angesprochen. Durch den Vergleich mit Realfahrzeugdaten kann die absolute oder relative Validität dieses Systems geprüft werden. Da es dadurch noch nicht möglich ist, eine belastbare Aussage zur Auswirkung der einzelnen Simulatorkomponenten auf den Realitätsgrad zu treffen, sind wiederum gezielte Variationen notwendig. Anders als im Realfahrzeug wird dort keine direkte Beeinflussung der Wahrnehmungsleistung vorgenommen, sondern ein indirektes Vorgehen mittels veränderter Simulatortechnik angewandt. Ausgehend von der Basiskonfiguration eines Simulators werden einzelne, quantifizierbare Veränderungen am Simulator durchgeführt. Damit können auftretende Effekte im Fahrerverhalten oder bei der Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften direkt auf diese zurückgeführt werden. Im Gegensatz zu den Realfahrzeugstudien wird hier ein additives Vorgehen gewählt. Dies bedeutet, dass immersionssteigernde Veränderungen, die ein Verbesserungspotential bieten, durchgeführt werden.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass als Ausgangsbasis eine verhältnismäßig einfache Simulatorkonfiguration dienen kann, bei der die Weiterentwicklungsmöglichkeiten geprüft werden sollen. Wie zuvor angesprochen, ist die Zielsetzung keine Gestaltung eines Simulators mit Ausschöpfung der maximalen technischen Machbarkeit, sondern ein möglichst kostengünstiges Entwicklungswerkzeug, das der Fragestellung nach der Erlebbarkeit von Fahrverhalten genügt. Im Fokus stehen Maßnahmen, die zu einer Verbesserung im Bereich der vestibulären Wahrnehmung führen, da diese für das Erleben von Fahrverhalten besondere Relevanz besitzt.

3.3.3 Machbarkeitsstudie zum Einsatz neuer Simulationstechnologie

Die abschließende Studie fokussiert die Umsetzung technologischer Neuheiten zur verbesserten Darstellung vestibulärer Informationen im Fahrsimulator. Während die vorangegangenen Realfahrzeug- und Simulatorstudien vornehmlich auf Fragen der menschlichen Wahrnehmung und deren Einfluss auf das Fahrerverhalten und die Beurteilungsqualität eingehen, wird hier der Einsatz eines zusätzlichen technischen Systems geprüft. Die Zielsetzung ist zunächst eine Bestätigung der Wirkweise und Funktionsfähigkeit dieser Technologie. Im zweiten Schritt ist der Nachweis zu erbringen, dass mit einer verhältnismäßig kostengünstigen Technologie ein ausreichend hoher Immersionsgrad und somit ein Verbesserungspotential erreicht werden kann.



3.4 Kennwerte der Fahr- und Beurteilungsaufgaben

Zur Bewertung der Fahr- und Beurteilungsaufgaben werden in den Probandenstudien Kennwerte zum Fahrerverhalten und der Beurteilungsqualität erfasst. Die subjektive Beurteilungsqualität wird anhand zweier Kennwerte beschrieben, das objektiv erfassbare Fahrerverhalten wird mittels je fünf Kennwerten der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene erhoben. Nachfolgend finden sich die zugehörigen Definitionen.

3.4.1 Kennwerte zur Beschreibung der Beurteilungsqualität

- **Differenzierungsfähigkeit [%]:** Anteil der richtigen Entscheidungen beim Wiedererkennen einer Fahrzeugeinstellung im Blindversuch. Im Rahmen der Arbeit muss die Entscheidung grundsätzlich zwischen zwei Varianten einer Fahrzeugcharakteristik getroffen werden. Sofern die Einstellung nicht erkannt wird, kann dies vom Probanden ebenfalls angegeben werden. Die Aussage wird dann den falschen Antworten zugeordnet, gleichzeitig wird die schlechteste Stufe der nachfolgend beschriebenen Beurteilungssicherheit vergeben.
- **Beurteilungssicherheit [1-15 Punkte]:** Der Wert beschreibt die subjektiv empfundene Sicherheit, mit der die Differenzierung der Fahrzeugeinstellung erfolgt ist. Die Auswahl wird zunächst zwischen fünf Kategorien (sehr sicher – sicher – neutral – unsicher – sehr unsicher) getroffen. Die verbale Beschreibung und die Reduktion auf fünf Stufen erleichtert dem Probanden die Selektion (Rohrmann, 1978). Um dennoch eine feinere Abstufung zu erhalten, wird das auf Heller (1982) zurückgehende Verfahren der Kategorieunterteilung angewandt. Dabei hat der Proband nochmals die Möglichkeit, eine Tendenz innerhalb der gewählten Kategorie zu bestimmen (-, 0, +). Zur Auswertung ergibt sich insgesamt eine aufsteigende Skala mit 15 Punkten, bei der ein kleiner Wert einer sicheren Entscheidungsfindung bzw. Beurteilung entspricht.

3.4.2 Kennwerte zur Beschreibung des Fahrerverhaltens

Bei der Beschreibung der Kennwerte zum Fahrerverhalten wird eine Unterteilung in Bahnführungs- und Stabilisierungsebene vorgenommen. Da nicht jeder Regeleingriff des Fahrers zwangsläufig in einer messbaren Veränderung auf Bahnführungsebene resultiert, dennoch aber einen Beleg für unterschiedliches Fahrerverhalten darstellt, empfiehlt sich die gesonderte Betrachtung beider Ebenen. Viele der Größen sind abhängig von der Fahrtstrecke oder dem Fahrzeug und somit nur bei konstant gehaltenen Rahmenbedingungen vergleichbar. Die Auswahl deckt möglichst vollständig den Bereich der menschlichen Wahrnehmung für Fahrdynamik ab. Dazu wird nochmals auf Tabelle 2-2 verwiesen.



3.4.2.1 Objektive Kennwerte auf Bahnführungsebene

- **Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit [km/h]:** Arithmetisches Mittel des Geschwindigkeitsverlaufs. Eine Veränderung des Kennwertes lässt oftmals Rückschlüsse auf Eingewöhnungs- und Trainingseffekte zu, außerdem können interindividuelle Interpretationen der Fahraufgabe ermittelt werden.
- **Minimum der Längsbeschleunigung [m/s^2]:** Die im Fahrtverlauf minimal auftretende Längsbeschleunigung bzw. das negative Extremum ist gleichbedeutend mit einem starken Bremsengriff des Fahrers. Hohe negative Werte zeigen demnach ein ungleichmäßiges Fahrerverhalten und stellen auf einer Fahrtstrecke ohne Bedarf an stärkeren Bremsungen einen Indikator für korrigierte Fahrfehler dar.
- **Durchschnittliche Giergeschwindigkeit [$^\circ/\text{s}$]:** Arithmetisches Mittel des Verlaufs der Giergeschwindigkeit. Diese Größe der Querdynamik ist über das Fahrverhalten des Fahrzeugs direkt mit der Fahrgeschwindigkeit gekoppelt. Der Wert ermöglicht Rückschlüsse auf die Strategie der Querführung des Fahrers.
- **Durchschnittliche Querbeschleunigung [m/s^2]:** Arithmetisches Mittel des Verlaufs der Querbeschleunigung. Auch zwischen dieser Kenngröße und der Fahrgeschwindigkeit besteht eine direkte Abhängigkeit. Die durchschnittliche Querbeschleunigung dient als Indikator für die Ausnutzung des querdynamischen Potentials des Fahrzeugs.
- **Maximale Querbeschleunigung [m/s^2]:** Während des Fahrtverlaufs auftretendes Maximum der Querbeschleunigung. Neben dem gezielt herbeigeführten Auftreten durch hohe Kurvengeschwindigkeiten kann der Wert oftmals auch als Folge von Lenkfehlern interpretiert werden.

3.4.2.2 Objektive Kennwerte auf Stabilisierungsebene

- **Durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit [$^\circ/\text{s}$]:** Arithmetisches Mittel des Geschwindigkeitsverlaufs der Lenkradbewegungen. Die so erzeugte Größe ist stark fahrzeug- und streckenabhängig, bei vergleichbaren Randbedingungen können Aussagen zur Gleichmäßigkeit des Lenkverhaltens getroffen werden.
- **Standardabweichung des Lenkradwinkels [$^\circ$]:** Aus dem Verlauf des Lenkradwinkels errechnete Standardabweichung nach DIN EN ISO 17287. Der Kennwert wird zur Beschreibung der Gleichmäßigkeit der Lenkradbetätigung herangezogen. Erhöhte Werte deuten auf unruhiges oder von einzelnen Fahrfehlern durchsetztes Fahrerverhalten hin.
- **Maximaler Lenkradwinkel [$^\circ$]:** Während des Fahrtverlaufs auftretender maximaler Lenkradwinkel. Der Wert ist generell stark abhängig vom Lenkradwinkelbedarf aufgrund von Streckenverlauf und Fahrgeschwindigkeit. Erhöhte Messwerte zeigen einzelne Fehler im Fahrtverlauf an.

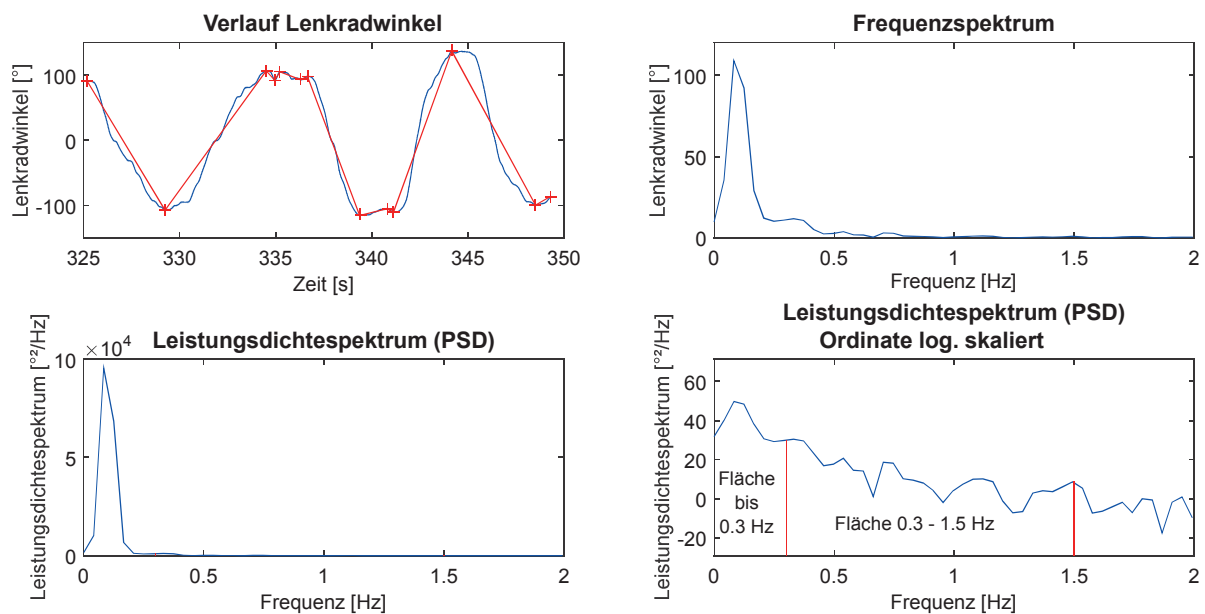


Abbildung 3-3: (v. l. n. r.) Zeitlicher Verlauf des Lenkradwinkels, Lenkradwinkel über der Frequenz, Leistungsdichtespektrum über der Frequenz und logarithmiertes Leistungsdichtespektrum über der Frequenz eines exemplarischen Datensatzes. Veranschaulicht (in rot) sind die Lenkrückstellungen größer 5° (l. o.) und die Flächenanteile des Lenkfrequenzverhältnisses (r. u.).

- **Lenkrückstellrate [n/s]:** Anzahl der Umkehrungen im Lenkradwinkelverlauf im Verhältnis zur zeitlichen Dauer der Fahrt nach DIN EN ISO 17287. Als Umkehrpunkt definiert wird jedes Minimum oder Maximum, das aus einer gegenläufigen Lenkradbetätigung mit einer Differenz von mindestens 5° zum vorhergehenden Umkehrpunkt entsteht. Diese Amplitudendifferenz ist prinzipiell frei wählbar. Nach Knappe, Keinath, Bengler und Meinecke (2007) empfiehlt es sich, den Wert mit der größten Effektstärke zu nutzen.
- **Lenkfrequenzverhältnis [-]:** Quotient aus hoch- und niederfrequenten Anteilen des Leistungsdichtespektrums der Lenkfrequenz. Das aus einer gewichteten Fourier-Transformation gewonnene Leistungsdichtespektrum stellt ein quantifizierbares Maß für die verrichtete Lenkarbeit dar (vgl. Kraft, 2011). Durch anteilige Integration des Signals und anschließende Verhältnisbildung ergibt sich ein Kennwert, der den Anteil hochfrequenten Korrekturen in Bezug zu niederfrequenten Lenkvorgängen auf Bahnführungsebene beschreibt. Nach Hackenberg und Heißing (1982) treten Lenkbewegungen überwiegend im Bereich zwischen 0,1 Hz und 0,5 Hz auf. Basierend auf Frequenzanalysen der Versuchsreihen der vorliegenden Arbeit wird als Grenze zwischen Bahnführung und stabilisierenden Korrekturen ein Wert von 0,3 Hz angewandt. Dies ist übereinstimmend mit



der Definition der High Frequency Components nach Östlund et al. (2004), einem ähnlich gestalteten Kennwert, bei dem Lenkbewegungen zwischen 0,3 Hz und 0,8 Hz als Korrekturen aufgefasst werden. Im Gegensatz dazu wird hier die obere Grenze bei 1,5 Hz angesetzt, da auch im Bereich über 0,8 Hz bewusste Lenkkorrekturen vermutet werden. Der Wert wird in Abbildung 3-3 grafisch veranschaulicht.

3.4.3 Inferenzstatistische Auswertungsverfahren

Die beschriebenen Kennwerte des vorangegangenen Kapitels werden je nach Versuchsteil in den Probandenstudien eingesetzt, um Hypothesen zu Unterschieden des Mittelwerts bzw. Medians zu prüfen. Wie später im Detail erklärt, werden messwiederholte Versuchsdesigns mit verbundenen Stichproben genutzt. Die übergreifend gültigen Aussagen zu den zugehörigen Verfahren der Inferenzstatistik werden nachfolgend beschrieben. In den jeweiligen Versuchskapiteln erfolgt ggf. eine weitere Spezifizierung.

3.4.3.1 Verfahren zur Bewertung der subjektiven Daten

Der Kennwert der Differenzierungsfähigkeit fordert eine dichotome Entscheidung. Für dieses Nominalskalenniveau wird die statistische Analyse mittels des Cochrans-Q-Tests vorgenommen, der sich für verbundene Stichproben mit mehr als zwei Gruppen eignet (Field, 2013). Mittels dieses Verfahrens wird zunächst eine generelle Aussage zur statistischen Signifikanz ermöglicht. Eine weiterführende Betrachtung der Unterschiede zwischen jeweils zwei Gruppen bietet der Test nach McNemar (Field, 2013).

Die Beurteilungssicherheit wird mittels einer Likert-Skala erfasst. Für die auf diese Weise erhobenen Daten wird in dieser Arbeit ordinalskaliertes Niveau angenommen, da nicht sichergestellt werden kann, dass die Probanden die Abstände zwischen den Auswahlkriterien von sehr sicher bis sehr unsicher als äquidistant ansehen. Als übergreifender Test für mehr als zwei Gruppen bei verbundenen Stichproben kann der Friedman-Test angewandt werden (Bühner & Ziegler, 2009). Für einzelne paarweise Vergleiche im Rahmen von Post-Hoc-Tests eignet sich der Vorzeichentest, allerdings besitzt dieser eine geringere Teststärke (Field, 2013).

Zur Beschreibung der Beurteilungssicherheit wird auch die Verteilungsbreite betrachtet. Dies geschieht allerdings rein deskriptiv mittels einer Betrachtung des Interquartilsabstands der jeweiligen Gruppen, da nach Bortz, Lienert, Barskova, Leitner und Oesterreich (2008) keine etablierten inferenzstatistischen Verfahren zur Betrachtung von Streuungsänderungen bei verteilungsfreien Daten gepaarter Stichproben existieren.



3.4.3.2 Verfahren zur Bewertung objektiver Daten

Die erhobenen objektiven Daten sind durchgängig intervallskaliert und ermöglichen damit die Anwendung der Varianzanalyse bei einem messwiederholten Versuchsdesign mit mehreren Faktoren (vgl. Vollrath, 2015). Als Voraussetzung der Berechnung ist die Annahme von Zirkularität, auch als Sphärizität bezeichnet, zu prüfen. Dies bedeutet, dass Varianzhomogenität zwischen jeweils zwei Faktorstufen nachgewiesen werden muss oder ein geeignetes Verfahren zur Reduktion der Freiheitsgrade Anwendung finden sollte (Rasch, Frieze, Hofmann & Naumann, 2010). Bortz und Schuster (2010) weisen darauf hin, dass ohne Korrektur Entscheidungen getroffen werden, welche die Alternativhypothese „häufiger begünstigen als nach dem nominellen Signifikanzniveau α zu erwarten wäre“ (Bortz & Schuster, 2010, S. 299). Dagegen kann eine Verletzung der Normalverteilung der Fehlerkomponenten unter gewissen Umständen akzeptiert werden. Dazu zählt, dass „Abweichungen von der Normalität [...] zu vernachlässigen [sind], wenn die Populationsverteilungen schief sind“ (Bortz & Schuster, 2010, S. 214). Weiterhin sollte bei verletzten Voraussetzungen die Probandenzahl mindestens zehn Personen pro Gruppe betragen (Bortz & Schuster, 2010).

3.4.3.3 Festlegung und Anpassung des Signifikanzniveaus

Generell wird in der vorliegenden Arbeit das akzeptierte Niveau eines Fehlers 1. Art bzw. α -Fehlers, also das falsche Ablehnen der Nullhypothese, auf .05⁷ festgesetzt. Eine Ausnahme bildet der Cochran-Q-Test, hier wird auf Basis der Beschreibung von Pereira, Patsopoulos, Salanti und Ioannidis (2010) wegen der geringen Teststärke ein Signifikanzniveau von .10 angenommen.

Das wiederholte Durchführen von Einzeltests führt zur ungewollten Inflation des α -Fehlers (Bortz & Schuster, 2010). Für paarweise Vergleiche im Rahmen von Post-Hoc-Tests ist demnach eine Korrektur notwendig. Im Gegensatz zur Methode nach Bonferroni, welche den α -Fehler durch die Anzahl der Tests teilt, wird, den Empfehlungen von Bühner und Ziegler (2009) folgend, das als weniger konservativ eingeschätzte Verfahren nach Bonferroni-Holm angewandt.

Dabei werden die p-Werte der Einzeltests nach der Größe des Effekts sortiert und nur beim ersten Rangplatz eine Korrektur mittels der Anzahl der Tests durchgeführt. Bei den weiteren Tests wird der Divisor jeweils um einen Wert, also die Anzahl der bereits durchgeführten Tests,

⁷ Zur Kennzeichnung statistischer Werte wie Wahrscheinlichkeiten, Test- und Effektstärken wird in der vorliegenden Arbeit generell auf die englischsprachige Notation mit Dezimalpunkt und ohne führende Null zurückgegriffen.



reduziert. Das Verfahren endet, sobald keine Signifikanz festgestellt werden kann. (vgl. Holm, 1979)

3.4.3.4 Ermittlung von Effekt- und Teststärke

Neben der Festlegung des Fehlers 1. Art ist auch die Kontrolle des Fehlers 2. Art, die falsche Annahme der Nullhypothese, unabdingbar. Die Beschreibung erfolgt über den als Teststärke $(1-\beta)$ bezeichneten Gegenwert. Weiterhin wird die Effektstärke bzw. -größe ermittelt. Zum einen bildet der Wert eine Voraussetzung zur Berechnung der Teststärke, zum anderen gibt er Auskunft über die Größe und damit der praktischen Relevanz eines Unterschieds (Bortz & Schuster, 2010). Im Fall verbundener Stichproben ist allerdings nur eine eingeschränkte Diskussion von Effektstärken möglich. Das Auftreten von Interaktionen zwischen den Daten verhindert eine allgemeingültige Betrachtung und schränkt die Vergleichbarkeit von Effektstärken zwischen unterschiedlichen Versuchsreihen ein (Rasch et al., 2010).

Für den Cochran-Q-Test sowie für die Testverfahren nach McNemar und Friedman, die mit χ^2 -verteilten Prüfgrößen arbeiten, kann die Effektstärke ω nach Bühner und Ziegler (2009) wie folgt abgeschätzt werden:

$$\omega = \sqrt{\frac{\chi^2}{n}}$$

χ^2 = Prüfgröße des Tests

n = Anzahl der Versuchspersonen

Der Vorzeichentest nutzt den z-Wert als Prüfgröße, die Effektstärke Φ wird mittels folgender Formel approximiert (Bühner & Ziegler, 2009):

$$\Phi = \frac{z}{\sqrt{n}}$$

z = Prüfgröße des Tests

n = Anzahl der Versuchspersonen

Nach Bühner und Ziegler (2009) gelten für die Effektstärkemaße ω bzw. Φ Werte von .10 als kleiner, .30 als moderater und .50 als großer Effekt. Es erfolgt aber auch hier nochmals der Hinweis, dass die Größenordnungen von Cohen (1988) ursprünglich für unabhängige Stichproben entwickelt wurden und prinzipiell auch nur in diesem Kontext Gültigkeit besitzen.

Zur Beschreibung der Effektstärke der Varianzanalyse wird das partielle Eta-Quadrat (η_p^2) angegeben. Nach Rasch et al. (2010) gibt die Größe „[...] den Anteil der Varianz an, der durch den Effekt auf der Stichprobenebene aufgeklärt wurde“ (Rasch et al., 2010, S. 113). Da dieser Wert

automatisiert mittels der Software SPSS (Version 19, IBM) ermittelt werden kann, wird auf eine weitere Darstellung der Berechnung verzichtet.

Als Größenordnungen für η_p^2 sind .01 als kleiner, .06 als mittlerer und .14 als großer Effekt definiert (Bühner & Ziegler, 2009). Für die Verfahren nach McNemar und Friedman sowie für den Vorzeichentest wird zur Berechnung der Teststärke die Software G*Power (Version 3.1, Universität Düsseldorf) genutzt. Im Fall der Varianzanalyse ermöglicht SPSS eine direkte Berechnung. Nach Bühner und Ziegler (2009) gilt es allerdings zu beachten, dass die tatsächliche Teststärke oftmals höher liegt, da die Korrelation der Daten nur unzureichend berücksichtigt wird. Alternativ wird deshalb eine Berechnung mit G*Power unter Einbeziehung zuvor bestimmter Korrelationen vorgenommen.

Kapitel 4

Probandenstudien im Realfahrzeug

Im Weiteren werden drei Versuchsreihen zur Längs-, Quer- und Vertikaldynamik im Realfahrzeug beschrieben. Im ersten Unterkapitel 4.1 wird die schematische Versuchsstruktur mit den Versuchsfaktoren und erhobenen Kennwerten gezeigt. Für jede Versuchsreihe werden die Hypothesen, die sich aus den Fragestellungen von Kapitel 3.1 ableiten, formuliert. Beschreibungen zur Realisierung des definierten Versuchsdesigns sowie zum Versuchsablauf mit einer präzisen Beschreibung der Fahr- und Beurteilungsaufgaben folgen in Kapitel 4.2. Die Darstellung der Ergebnisse schließt sich in Kapitel 4.3, die Diskussion in Kapitel 4.4 an.

Die Erklärungen zum Design der Querdynamikversuche erfolgen dabei analog zu Wiedemann et al. (2014b), die Diskussion der subjektiven Daten wird um zusätzliche Betrachtungen ergänzt. Die Datenerhebung wurde unterstützt durch die Studienarbeit von Ceh (2013). In dieser wurden weitere Fahraufgaben analysiert, die im Rahmen der Fragestellung der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet werden.



4.1 Zielsetzung und Versuchsdesign

Zum einen verfolgen die drei Probandenstudien das Ziel, den Einfluss der visuellen und akustischen Wahrnehmung auf das Fahrerverhalten zu analysieren. Zum anderen werden Quereffekte dieser beiden Wahrnehmungskanäle bei Beurteilungsaufgaben, die vorwiegend die somatosensorischen und vestibulären Sinnessysteme erfordern, untersucht. Als grundlegende Form der Beurteilung sollen in jeder Versuchsreihe je zwei Varianten einer Fahrzeugeigenschaft differenziert werden. Insgesamt wird somit eine Betrachtung der übergreifenden Fragestellungen zur Erlebbarkeit von Fahrzeugeigenschaften, vgl. Kapitel 3.1.3, ermöglicht.

Zum Abgleich und der Plausibilisierung können Erkenntnisse anderer Forschungsarbeiten herangezogen werden. Ein überwiegender Anteil aktueller Untersuchungen beschäftigt sich mit dem Einfluss von Nebentätigkeiten auf das Fahrerverhalten im Bereich der Verkehrssicherheitsforschung oder Fahrerassistenzentwicklung. Vereinzelt finden sich aber auch grundlegende Analysen zum Zusammenhang von menschlicher Wahrnehmung und Fahrerverhalten, wie in dem bereits zitierten Beitrag von Gratzner (2007) zur visuellen Informationsaufnahme. Weiterhin sind Ergebnisse aus dem Simulationsumfeld verfügbar. Beispielsweise untersuchen Knappe et al. (2007) den Einfluss des Sichtfeldes im Fahrsimulator auf Lenkverhalten und Querführung.

Der Zusammenhang von menschlicher Wahrnehmung und der Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften kann ebenfalls in verschiedenen Untersuchungen nachvollzogen werden. Die Studie von Müller, Hajek, Radic-Weissenfeld und Bengler (2013) zeigt die Erfassung von Unterschieden bei Beschleunigungsvorgängen und die Ermittlung längsdynamischer Wahrnehmungsschwellen. Als Beispiel aus dem Bereich der Querdynamik beurteilen die Probanden in der bei Lange, Maas, Albert, Siedersberger und Bengler (2014) beschriebenen Versuchsreihe das Verhalten des Fahrzeugs bei automatisierten Fahrstreifenwechseln.

Neben der Analyse des Einflusses der visuellen und akustischen Wahrnehmung auf Fahrerverhalten und Beurteilungsqualität dient die Datenbasis der Versuchsreihen als Referenz für die folgenden Versuchsreihen im Fahrsimulator.

4.1.1 Versuchsreihe Längsdynamik

Die **Fahraufgabe** im Versuch zur Längsdynamik besteht aus wiederholten Volllastbeschleunigungen auf gerader Strecke. Bei diesen Fahrten erfolgt eine stufenweise Einschränkung des Hörvermögens.

Gleichzeitig ist als **Beurteilungsaufgabe** die Motorcharakteristik des Fahrzeugs in zwei Varianten zu differenzieren, die sich im unterschiedlichen Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs



widerspiegelt. Dieses kann direkt durch das vestibuläre System erfasst werden oder mechanorezeptorisch in Form eines veränderten Druckgefühls im Fahrersitz. Das propriozeptive System kann zusätzlich eine veränderte Fußgelenkstellung am Gaspedal wahrnehmen.

4.1.1.1 Versuchsfaktoren

Das Versuchsdesign sieht die Variation von zwei Faktoren vor. Als Erstes ist dies die Einschränkung der akustischen Wahrnehmung der Versuchsperson. Dieser Faktor besitzt drei Stufen, eine Referenzstufe ohne Einschränkung, eine moderate und eine starke Einschränkung des Hörvermögens.

Tabelle 4-1: Versuchsfaktoren der Versuchsreihe Längsdynamik

Faktor	Akustische Einschränkung	Motorcharakteristik
Stufen	Referenz	comfort
	Einschränkung Stufe 1	dynamic
	Einschränkung Stufe 2	

Als zweiter Faktor wird die Motorcharakteristik des Fahrzeugs in den Stufen comfort und dynamic variiert. Dieser dient ausschließlich dazu, die Beurteilungsaufgabe zu ermöglichen, bei der die Probanden diese beiden Stufen unterscheiden sollen. Weitere Analysen des Faktors erfolgen deshalb nicht.

4.1.1.2 Hypothesen und zugehörige Kennwerte

Die Hypothesen nehmen Unterschiede in der Beurteilungsqualität an, die durch die Einschränkung der akustischen Wahrnehmung beim Differenzieren und Beurteilen der Fahrzeugeigenschaft der Motorcharakteristik auftreten können.

Hypothesen und Kennwerte der Versuchsreihe Längsdynamik			
Faktor akustische Einschränkung			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Motorcharakteristik eines Fahrzeugs.	Differenzierungsfähigkeit
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit negativ.	
	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Motorcharakteristik eines Fahrzeugs.	Beurteilungssicherheit
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Beurteilungssicherheit negativ.	

Abbildung 4-1: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Längsdynamik



Da die später im Detail beschriebene Fahraufgabe einer Volllastbeschleunigung keine individuellen Unterschiede in der Ausführung ermöglicht, werden zum Fahrerverhalten keine Hypothesen aufgestellt und auf eine Analyse verzichtet. Folglich werden zur Beantwortung der Fragestellungen ausschließlich die beiden subjektiven Kennwerte zur Beurteilungsqualität, die Differenzierungsfähigkeit und die Beurteilungssicherheit, erhoben, vgl. Kapitel 3.4.1.

4.1.2 Versuchsreihe Querdynamik

Im Bereich der Querdynamik wird als **Fahraufgabe** ein Handlingkurs befahren und der Einfluss der akustischen wie auch der visuellen Wahrnehmung auf das Fahrerverhalten betrachtet. In einem ersten Versuchsteil erfolgt die schrittweise Verminderung des gesamten Hörvermögens, während in einem zweiten Versuchsteil der horizontale Sichtwinkel stufenweise eingeschränkt wird.

Als **Beurteilungsaufgabe** soll während der akustischen oder visuellen Einschränkung zusätzlich eine Differenzierung zweier unterschiedlicher Lenkungscharakteristiken erfolgen. Diese Unterscheidung des Lenkradmomentenverlaufs ist durch den Kraft- und Lagesinn des somatosensorischen Systems möglich, der bei gleichem Lenkradwinkel ein unterschiedliches Kraftniveau detektieren kann.

4.1.2.1 Faktoren

Nachfolgend sind die Faktoren der Fahr- und Beurteilungsaufgabe für den ersten und zweiten Versuchsteil aufgeführt. Im ersten Teil wird die akustische Wahrnehmung in drei Stufen variiert, eine Referenzstufe ohne Einschränkung, eine Stufe mit schwacher und eine Stufe mit starker Einschränkung. Als zweiter Faktor wird die Lenkungscharakteristik mit den Stufen comfort und dynamic analysiert. Wie zuvor dient dieser Faktor ausschließlich der Umsetzung der Beurteilungsaufgabe, bei der ein Unterschied zwischen comfort- und dynamic-Modus erkannt werden soll. Eine weitere Betrachtung in Form von Versuchshypothesen erfolgt nicht.

Tabelle 4-2: Faktoren des ersten Versuchsteils zur Querdynamik

Faktor	Akustische Einschränkung	Lenkungscharakteristik
Stufen	Referenz	comfort
	Einschränkung Stufe 1	dynamic
	Einschränkung Stufe 2	

Anstelle des Faktors der akustischen Einschränkung wird im zweiten Versuchsteil die visuelle Wahrnehmung in ebenfalls drei Stufen variiert. Der zweite Versuchsfaktor der Lenkungscharakteristik bleibt unverändert.



Tabelle 4-3: Faktoren des zweiten Versuchsteils zur Querdynamik

Faktor	Visuelle Einschränkung	Lenkungscharakteristik
Stufen	Referenz	comfort
	Einschränkung Stufe 1	dynamic
	Einschränkung Stufe 2	

4.1.2.2 Hypothesen und zugehörige Kennwerte

Durch die mehrstufige Einschränkung der akustischen Wahrnehmung werden Unterschiede in der Ausführung der Fahr- wie auch der Beurteilungsaufgabe vermutet. Folgende Hypothesen, vgl. Abbildung 4-2, werden deshalb im ersten Teil der Querdynamik-Versuchsreihe geprüft:

Hypothesen und Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik			
Versuchsteil 1: Faktor akustische Einschränkung			
			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Lenkungscharakteristik eines Fahrzeugs.	Differenzierungs-fähigkeit
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit negativ.	
	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Lenkungscharakteristik eines Fahrzeugs.	Beurteilungs-sicherheit
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Beurteilungssicherheit negativ.	
Fahrerverhalten	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Bahnführungsebene.	5 Kennwerte der Bahnführungs-ebene
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst das Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene.	
	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Stabilisierungsebene.	5 Kennwerte der Stabilisierungs-ebene
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst das Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene.	

Abbildung 4-2: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik -
Teil 1 - Faktor akustische Einschränkung

Für den zweiten Versuchsteil mit visueller Einschränkung des Fahrers werden identische Auswirkungen erwartet, vgl. Abbildung 4-3.

In beiden Versuchsteilen werden zur Analyse der Beurteilungsqualität die Differenzierungsfähigkeit sowie die Beurteilungssicherheit erfasst. Bei der Bewertung des Fahrerverhaltens wird auf den vollen Umfang der in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Kennwerte zurückgegriffen. Für die Bahnführungsebene sind dies die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, das Minimum der



Längsbeschleunigung, die durchschnittliche Giergeschwindigkeit, die durchschnittliche Querschleunigung sowie die maximale Querschleunigung.

Hypothesen und Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik			
Versuchsteil 2: Faktor visuelle Einschränkung			
			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Die visuelle Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Lenkungscharakteristik eines Fahrzeugs.	Differenzierungsfähigkeit
	H1	Die visuelle Einschränkung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit negativ.	
	H0	Die visuelle Einschränkung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Lenkungscharakteristik eines Fahrzeugs.	Beurteilungssicherheit
	H1	Die visuelle Einschränkung beeinflusst die Beurteilungssicherheit negativ.	
Fahrerverhalten	H0	Die visuelle Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Bahnführungsebene.	5 Kennwerte der Bahnführungsebene
	H1	Die visuelle Einschränkung beeinflusst das Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene.	
	H0	Die visuelle Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Stabilisierungsebene.	5 Kennwerte der Stabilisierungsebene
	H1	Die visuelle Einschränkung beeinflusst das Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene.	

Abbildung 4-3: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik - Teil 2 - Faktor visuelle Einschränkung

Auf Stabilisierungsebene dienen die durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit, die Standardabweichung des Lenkradwinkels, der maximale Lenkradwinkel, die Lenkrückstellrate und das Lenkfrequenzverhältnis der Beschreibung des Fahrerverhaltens.

Diese im Vergleich zu den Versuchsreihen der Längs- und Vertikaldynamik deutlich umfangreichere Datenerhebung liegt darin begründet, dass die Fahrt auf einem Handlingkurs neben der querdynamischen Beurteilungsaufgabe auch die Möglichkeit bietet, das Zusammenspiel quer- und längsdynamischer Regeltätigkeiten des Fahrers vollumfassend aufzuzeichnen. Neben der Beantwortung der hier aufgestellten Hypothesen werden so auch umfangreiche Vergleichsdaten für spätere Studien erzeugt.

4.1.3 Versuchsreihe Vertikaldynamik

Die Untersuchung zur Vertikaldynamik fordert als **Fahraufgabe** das Befahren einer Schlechtwegestrecke. Dabei erfolgt ebenfalls die akustische Einschränkung, mit dem Ziel, den Einfluss auf das Fahrerverhalten und insbesondere die Wahl der Fahrgeschwindigkeit zu messen.



Als **Beurteilungsaufgabe** während dieser Fahrt sollen zwei Fahrwerkscharakteristiken differenziert werden. Wahrnehmbar ist dieser Unterschied über veränderte Aufbaubeschleunigungen, die im vestibulären System detektiert werden, aber auch somatosensorisch über Vibrationen im Fahrzeuginnenraum.

4.1.3.1 Faktoren

Wie bereits in den Versuchsreihen zuvor ist der Faktor der akustischen Einschränkung dreistufig, mit zwei Stufen der Einschränkung sowie einer Referenzstufe ohne Einschränkung. Der zweistufige Faktor der Fahrwerkscharakteristik dient wiederum ausschließlich der Darstellung der Differenzierungsaufgabe zwischen der comfort- und dynamic-Einstellung des Fahrwerks.

Tabelle 4-4: Versuchsfaktoren der Versuchsreihe Vertikaldynamik

Faktor	Akustische Einschränkung	Fahrwerkscharakteristik
Stufen	Referenz	comfort
	Einschränkung Stufe 1	dynamic
	Einschränkung Stufe 2	

4.1.3.2 Hypothesen und zugehörige Kennwerte

Analog zu den bereits beschriebenen Versuchsreihen werden Auswirkungen der akustischen Einschränkung auf die Beurteilungsqualität geprüft. Die Hypothesen beziehen sich dabei wiederum auf die Differenzierungsfähigkeit und die Sicherheit, mit der diese Beurteilung erfolgt. Von besonderem Interesse ist in dieser Versuchsreihe die Anpassung der Geschwindigkeit auf einer Schlechtwegestrecke.

Hypothesen und Kennwerte der Versuchsreihe Vertikaldynamik			
Faktor akustische Einschränkung			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Fahrwerkscharakteristik eines Fahrzeugs.	Differenzierungsfähigkeit
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit negativ.	
	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Fahrwerkscharakteristik eines Fahrzeugs.	Beurteilungssicherheit
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Beurteilungssicherheit negativ.	
Fahrerverhalten	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf die Wahl der Fahrgeschwindigkeit beim Befahren einer Schlechtwegestrecke.	Fahrgeschwindigkeit
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Wahl der Fahrgeschwindigkeit.	

Abbildung 4-4: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Vertikaldynamik



Deshalb fokussiert die Hypothese zum Fahrerverhalten diesen Aspekt der Bahnführungsebene. In Folge wird als Kennwert ausschließlich die Fahrgeschwindigkeit betrachtet.

4.1.4 Datenerhebung und statistische Bewertung der Versuchsfaktoren

Ergänzend zu den allgemeingültigen Aussagen zur Analyse der erhobenen Kennwerte mit Methoden der Inferenzstatistik in Kapitel 3.4.3 folgen weitere Hinweise zur Bewertung der zuvor diskutierten Versuchsfaktoren.

4.1.4.1 Objektive Daten des Fahrerverhaltens

Die Kennwerte des Fahrerverhaltens auf Bahnführungs- und Stabilisierungsebene besitzen als abhängige Variablen durchgängig Intervallskalenniveau. Als Verfahren der Inferenzstatistik wird in den Versuchsreihen zur Quer- und Vertikaldynamik eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung jedes Faktors in zwei bzw. drei Stufen gerechnet. Der Fokus liegt dabei auf einer gesamtheitlichen Aussage der Varianzanalyse zum Faktor der visuellen bzw. akustischen Einschränkung. Zur Ermittlung von Unterschieden zwischen den drei Stufen, Referenz ohne Einschränkung, Einschränkung Stufe 1 und Einschränkung Stufe 2, werden innerhalb dieses Faktors Post-Hoc-Tests durchgeführt. Auf weitere detaillierte Einzelprüfungen mittels Tukey-HSD-Tests, zur Prüfung aller Kombinationen der Stufen beider Faktoren gegeneinander, wird verzichtet. Dies liegt darin begründet, dass der Faktor der Lenkungs- oder Fahrwerkscharakteristik nicht näher analysiert werden soll, da er nur zur Darstellung der Beurteilungsaufgabe dient. Für die Varianzanalyse muss er allerdings beachtet werden, da der technische Unterschied zwischen den Stufen comfort und dynamic zwangsläufig zu Unterschieden zwischen den einzelnen Fahrten führt. Seitens des Fahrzeugherstellers ist diese Differenz bewusst in einer Größenordnung gewählt, die als kundenrelevant angenommen wird und sich deshalb auch im Fahrerverhalten widerspiegelt.

4.1.4.2 Subjektive Daten der Beurteilungsqualität

Bei den Messgrößen der Beurteilungsqualität wird ausschließlich der Faktor der akustischen oder visuellen Einschränkung betrachtet. Der Faktor der Motor-, Lenkungs- oder Fahrwerkscharakteristik entfällt als Versuchsfaktor, da dieser hier als Entscheidungskriterium zur Erhebung der dichotomen Differenzierungsfähigkeit dient. Die inferenzstatistische Analyse wird mittels des bereits beschriebenen Cochrans-Q-Tests ermöglicht. Auch zur Auswertung der ordinalskalierten Beurteilungssicherheit werden die Fahrten im comfort- und dynamic-Modus zusammengefasst, da die Bewertung in direktem Zusammenhang mit der Differenzierungsfähigkeit steht und nicht von der jeweiligen Fahrzeugcharakteristik beeinflusst wird. Damit verdoppelt sich der Stichprobenumfang bei allen subjektiven Daten der Beurteilungsqualität.

4.2 Realisierung des Versuchsdesigns

Im Weiteren wird die Umsetzung des in Kapitel 4.1 schematisch beschriebenen Versuchsdesigns dargestellt. Dabei wird auf die eingesetzte Technik, den Ablauf der Versuchsreihen und die teilnehmenden Probanden im Detail eingegangen.

4.2.1 Darstellung der Versuchsfaktoren im Realfahrzeug

Die Versuchsreihen fanden im Oktober 2012 auf dem Audi Prüfgelände Neustadt a. d. Donau statt. Für einen Feldversuch kann dadurch ein Höchstmaß an Reliabilität erzielt werden, da Faktoren wie der Fahrbahnzustand bekannt sind und auch der Einfluss von Fremdverkehr auf den Versuchsstrecken ausgeschlossen werden kann. Als Versuchsfahrzeug wird ein Audi A7 3.0 TFSI quattro, Baujahr 2012, mit Automatikgetriebe genutzt. Dieses Fahrzeug ist mit Mess- und Aufzeichnungstechnik zur Erfassung der fahrzeuginternen Signale auf dem CAN-Bus⁸ ausgerüstet, um die relevanten fahrdynamischen Größen erfassen zu können. Weiterhin verfügt es über das System Audi drive select, mit dem softwaregestützt die Charakteristik u. a. von Motor und Getriebe, der Lenkung und des Fahrwerks individualisiert werden kann.

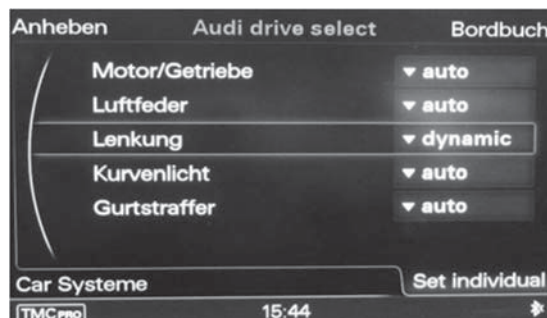


Abbildung 4-5: Das System Audi drive select zur Variation der Charakteristik von Motor und Getriebe, Lenkung und Fahrwerk

Die visuelle Einschränkung wird durch eine blickdichte Abdeckung der Fahrzeugscheiben realisiert. Bei der ersten Stufe verbleibt abhängig von der Kopfposition des Fahrers ein horizontales Sichtfeld von etwa 100°, in der zweiten Stufe entspricht der freibleibende Winkel 35°.

Die erste Stufe der akustischen Einschränkung wird durch den Einsatz von Noise-Cancelling-Kopfhörern (Bose Quiet Comfort 15) ermöglicht. Diese reduzieren mittels Anti-Schall-Techno-

⁸ CAN, kurz für *Controller Area Network*, bezeichnet ein serielles Bussystem im Fahrzeug.

logie vor allem gleichmäßige Geräuschpegel wie das Motorengeräusch oder das Reifenabrollgeräusch. Um in zweiter Stufe eine vollständige Geräuschabschirmung zu erreichen, werden die Kopfhörer mit Gehörschutzstöpsel mit einem Dämmwert von 33 dB kombiniert.

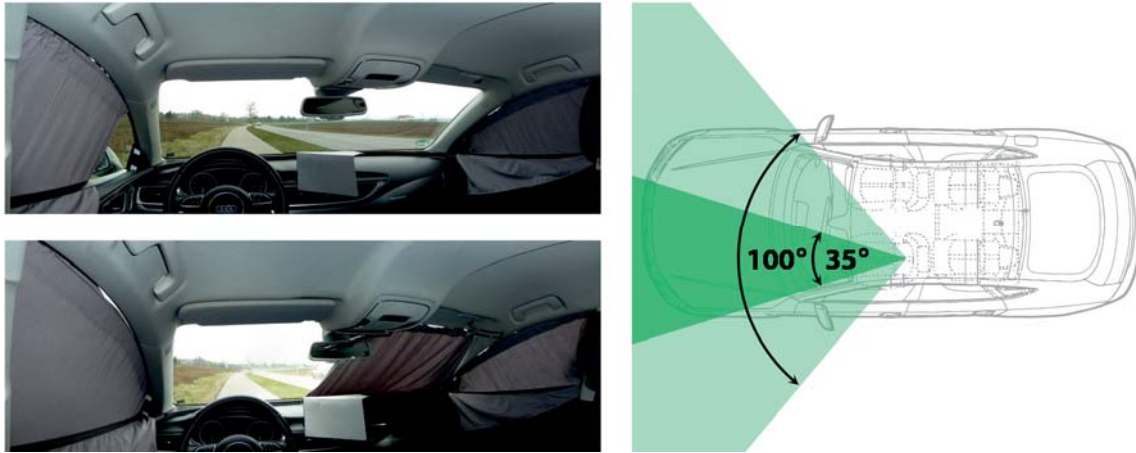


Abbildung 4-6: Einschränkung des horizontalen Sichtfeldes; o. l. erste Stufe, ca. 100°; u. l. zweite Stufe, ca. 35°

4.2.2 Versuchsaufbau

Die Probanden durchlaufen die Versuchsreihen im Within-Subjects-Design, jeder Teilnehmer wird also in jeder Kombination der Versuchsfaktoren getestet. Innerhalb der Versuchsreihen der Längs- und Vertikaldynamik wird die Abfolge der Fahrten vollständig permutiert. Aus organisatorischen Gründen werden in der Versuchsreihe der Querdynamik die Fahrten zur visuellen und zur akustischen Einschränkung in zwei getrennten Versuchsblöcken durchgeführt. Die Abfolge der Versuchsblöcke wie auch die Fahrten innerhalb der beiden Versuchsblöcke werden aber wiederum permutiert. Im Vorfeld der Datenerhebung werden zu jedem Versuchsteil mehrfach Probefahrten durchgeführt, um Trainingseffekte vorwegzunehmen.

Während der Probefahrten werden bei allen drei Versuchsreihen die verschiedenen Fahrzeugcharakteristiken mit den Varianten comfort und dynamic vorgestellt. Die Differenzierungsfähigkeit des Fahrers für die jeweilige Fahrzeugcharakteristik wird bei den anschließenden Versuchsfahrten in Form einer Wiedererkennungsaufgabe getestet. Dazu wird, für den Fahrer nicht bemerk- oder sichtbar, zu Beginn einer der beiden Fahrzeugmodi ausgewählt. Am Ende der jeweiligen Fahrt muss die Einstellung, comfort oder dynamic, benannt werden.

4.2.3 Gestaltung der Fahr- und Beurteilungsaufgaben

Einleitend wurden die Fahr- und Beurteilungsaufgaben der jeweiligen Versuchsreihen in Kapitel 4.1 bereits angesprochen. Im Weiteren werden diese Aufgabenstellungen und die zugehörigen



Versuchsstrecken im Detail beschrieben. Eine schematische Abbildung des Handlingkurses und der Schlechtwegestrecken findet sich in Anhang C.1 bzw. C.2.

4.2.3.1 Längsdynamik

Der Versuch der Längsdynamik erfolgt auf einem geraden Fahrstreifen mit ausreichender Länge für mehrere Volllastbeschleunigungen von 0 auf 100 km/h. Pro Versuchsvariante wird ein Beschleunigungsvorgang von 0 auf 100 km/h gefahren. Das System Audi drive select wird genutzt, um die Variation der Motorcharakteristik durch die Anpassung der Motor- und Getriebekennlinien darzustellen. Verwendet werden der efficiency- sowie der dynamic-Modus, deren Spreizung dem gewünschten, kundenrelevanten Unterschied im Fahrverhalten entspricht. Um eine Durchgängigkeit der Nomenklatur mit den Versuchsreihen der Quer- und Vertikaldynamik zu erreichen, wird der Modus efficiency ebenfalls mit comfort bezeichnet. Die Fahraufgabe wird als Volllastbeschleunigung, also mit maximaler Gaspedalstellung, ausgeführt. Die Kick-down- (Übergas-) Funktionalität des Automatikgetriebes wird nicht verwendet, da diese die Einstellungen des Audi drive select überlagert. Um eine visuelle Orientierung der Probanden an den Drehzahlen und Schaltstufen des Getriebes zu vermeiden, werden die entsprechenden Anzeigen des Kombiinstrumentes abgedeckt.

4.2.3.2 Querdynamik

Die Versuchsreihe zur Querdynamik wird auf einem etwa vier Meter breiten Lenkungshandlingkurs, der auf 1,7 km Länge 15 Kurven umfasst, gefahren. Davon werden im Mittelteil sieben Kurven mit gleichmäßigem Verlauf und ähnlichen Radien zur weiteren Auswertung betrachtet. Anders als in der Startphase kann hier von einer Fokussierung auf die Regeltätigkeiten der Querdynamik ausgegangen werden. Die Fahraufgabe für den Probanden besteht im zügigen, aber sicheren Befahren der Strecke. Zielsetzung ist, dass der Proband seine Fahrgeschwindigkeit derart anpasst, sodass er sich durch bahnführende und stabilisierende Regeleingriffe ausgelastet, aber nicht überlastet fühlt. Aufgrund großer interindividueller Unterschiede wäre die Vorgabe einer Minimal- oder Maximalgeschwindigkeit nicht zielführend. Zur Darstellung der beiden unterschiedlichen Lenkungscharakteristiken wird die comfort- und dynamic-Einstellung des Audi drive select eingesetzt. Die Differenz der beiden Modi ist wiederum kundenrelevant und liegt deutlich über der von Buschardt (2003) festgestellten Wahrnehmungsschwelle von 0,5 bis 0,8 Nm.

4.2.3.3 Vertikaldynamik

Die Analyse des Fahrerverhaltens und der Beurteilungsqualität zur Vertikaldynamik erfolgt auf zwei direkt aufeinanderfolgenden Schlechtwegestrecken. Der Oberflächenbelag besteht zum ei-



nen aus Betonplatten mit Schadstellen, zum anderen aus Kopfsteinpflaster. Die Aufgabenstellung der Fahraufgabe besteht in der Überfahrt der Streckenabschnitte in einer als komfortabel empfundenen Geschwindigkeit. Der Tachometer ist dabei abgedeckt. Die Fahrwerkscharakteristik wird vor jeder Fahrt zwischen den Modi comfort und dynamic variiert. Dies ist vom Probanden ebenfalls nicht einsehbar.

4.2.4 Stichprobenbeschreibung

An den Versuchsreihen nahmen 24 Mitarbeiter der Technischen Entwicklung der AUDI AG im Rahmen ihrer regulären Arbeitszeit teil. Durch regelmäßige betriebsärztliche Untersuchungen konnten die Probanden ausschließen, dass eine Schädigung des Hörvermögens oder eine Einschränkung des Sichtfeldes vorlag. Tabelle 4-5 gibt Auskunft über die wesentlichen Daten des Probandenkollektivs.

Tabelle 4-5: Probandenkollektiv der Versuchsreihen im Realfahrzeug (n=24)

Alter	
Mittelwert (Standardabw.)	34,3 Jahre (8,7 Jahre)
Anteil Männer	79,2 %
Fahrerfahrung	
Mittelwert (Standardabw.)	16,3 Jahre (8,8 Jahre)

Die Probandenzahl wird im Vorfeld der Versuche für den Versuchsfaktor der visuellen und akustischen Einschränkung abgeschätzt. Die folgenden Überlegungen bilden dazu die Grundlage:

- Der akzeptierte Fehler 1. Art soll weniger als .05, die Teststärke über .80 betragen.
- Die Korrelation zwischen den messwiederholten Stufen wird mit .6 angenommen, da es sich bei den Messfahrten um direkt aufeinanderfolgende Datenerhebungen bei einer eingeübten Tätigkeit handelt.
- Die Versuchsreihen sollen mindestens mittelgroße Effekte aufklären können. Den Erläuterungen nach Kapitel 3.4.3.4 bzw. Bühner und Ziegler (2009) folgend, wird deshalb die Effektstärke η_p^2 mit .06 angenommen.

Mittels der Software G*Power (Universität Düsseldorf) errechnet sich die benötigte Probandenzahl zu 23 Personen. Die Datenbasis von 24 Versuchsteilnehmern ist somit ausreichend und bietet die Sicherheit, einzelne Ausfälle in der Datenerhebung kompensieren zu können. Die Annahmen zu Korrelationen und Effektstärken werden in Vorversuchen sowie bei der Analyse erster Teildatensätze weitgehend bestätigt.



4.3 Ergebnisse

Die Betrachtung der Ergebnisse erfolgt getrennt nach den drei Versuchsreihen, im Fall der Quer- und Vertikaldynamik wird zusätzlich nach den Daten zum Fahrerverhalten und der Beurteilungsqualität unterschieden.

Bei den subjektiven Daten erhöht sich durch das in Kapitel 4.1.4.2 begründete Zusammenfassen des Faktors der Fahrzeugcharakteristik mit den beiden Stufen comfort und dynamic der Stichprobenumfang auf 48 Werte.

Eine Kurzdarstellung der objektiven Ergebnisse findet sich im Anhang A.1.

4.3.1 Ergebnisse Längsdynamik

Für die **Differenzierungsfähigkeit** der Probanden wird insgesamt betrachtet ein sehr hohes Niveau ermittelt, in der ersten Stufe der akustischen Einschränkung wird ein marginal höherer Wert erzielt als zu den anderen beiden Messzeitpunkten. Aufgrund der sehr geringen Differenzen fällt der Cochrans-Q-Test nicht signifikant aus, $\chi^2(2) = .13$; $p = .94$. Die Effektstärke ω liegt bei .05, die Teststärke beträgt .11.

Tabelle 4-6: Differenzierungsfähigkeit Motorcharakteristik, akust. Einschränkung, $n = 48$

	Anzahl richtig [-]	Anzahl falsch [-]	Differenzierungsfähigkeit [%]
Referenz	41	7	85,4
Einschränkung akust., Stufe 1	42	6	87,5
Einschränkung akust., Stufe 2	41	7	85,4

Auch bei der **Beurteilungssicherheit** lässt die Betrachtung der Gesamtbewertung mit einem Median von vier bzw. fünf Punkten keine größeren Abweichungen zwischen den Faktorstufen erkennen. Dies bestätigt die Analyse mittels des Friedman-Tests, $\chi^2(2) = .83$; $p = .66$. Der auftretende Effekt ist mit $\omega = .13$ als klein zu bezeichnen, daraus resultiert eine ebenfalls kleine und damit unzureichende Teststärke, $1 - \beta = .12$. Der Wertebereich der Skala wird in allen Versuchsbedingungen fast vollständig genutzt. Die Betrachtung des Interquartilsabstands zeigt die größte Variabilität bei der Referenzfahrt und eine leichte Abnahme bei den beiden Stufen der akustischen Einschränkung. Wesentliche Unterschiede ergeben sich bei der Analyse der richtigen und falschen Entscheidungen.

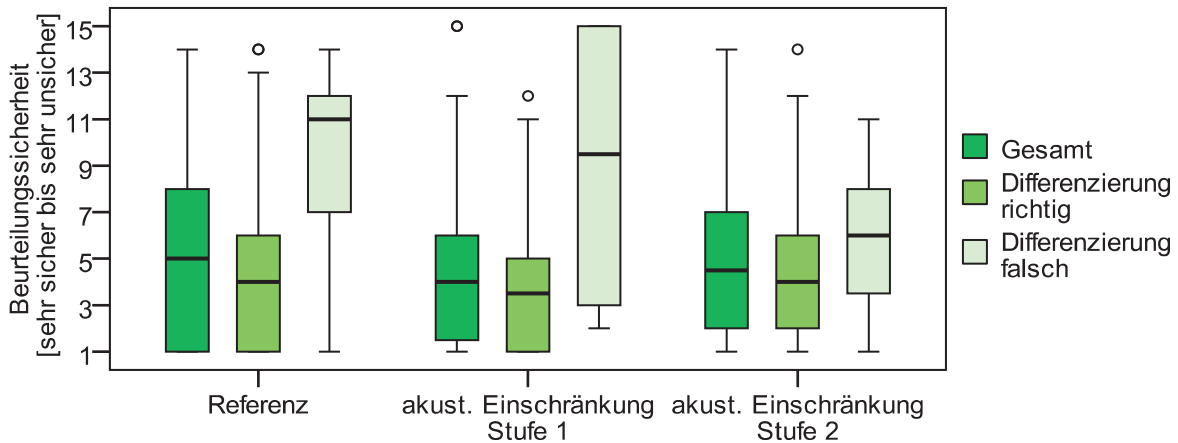


Abbildung 4-7: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Motorcharakteristik bei akustischer Einschränkung (Gesamt: n = 48), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung⁹

Insgesamt befinden sich der Median wie auch der gesamte Bereich der Bewertungen bei falsch getroffenen Entscheidungen auf einem höheren Niveau. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Spreizung der Mediandifferenz zwischen richtigen und falschen Entscheidungen mit zunehmender akustischer Einschränkung abnimmt.

4.3.2 Ergebnisse Querdynamik

Die Ergebnisse zur Versuchsreihe der Querdynamik beschreiben die subjektiven Daten der Differenzierungsfähigkeit und Beurteilungssicherheit sowie die je fünf objektiven Kennwerte der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene.

4.3.2.1 Subjektive Daten der Versuchsreihe Querdynamik

Die Probanden differenzieren die beiden Lenkungscharakteristiken bei der Referenzfahrt wie auch bei der ersten Stufe der visuellen Einschränkung mit über 80 % richtig. Bei der zweiten Stufe der visuellen Einschränkung ist ein leichter Rückgang der **Differenzierungsfähigkeit** zu verzeichnen, der aber nicht signifikant ausfällt, $\chi^2(2) = 1.20$; $p = .55$; $\omega = .16$; $1-\beta = .24$.

⁹ Die Bewertung bei richtigen und falschen Differenzierungen geht auf unterschiedlich große Datensätze zurück, abhängig von der Differenzierungsfähigkeit (vgl. Tabelle 4-6). Deshalb kann bei einem Versuchsdesign mit verbundenen Stichproben keine inferenzstatistische Analyse, sondern ausschließlich eine deskriptive Betrachtung erfolgen. Dieser Hinweis ist auch für alle weiteren Darstellungen der Beurteilungssicherheit gültig.

Tabelle 4-7: Differenzierungsfähigkeit Lenkungscharakteristik, vis. Einschränkung, n = 46¹⁰

	Anzahl richtig [-]	Anzahl falsch [-]	Differenzierungsfähigkeit [%]
Referenz	38	8	82,6
Einschränkung visuell, Stufe 1	38	8	82,6
Einschränkung visuell, Stufe 2	35	11	76,1

Für die gesamte **Beurteilungssicherheit** findet sich in der Boxplot-Darstellung keine Veränderung des Medians, dieser liegt zu allen drei Messzeitpunkten bei fünf Punkten. Auch hinsichtlich des Interquartilsabstands ergeben sich keine wesentlichen Veränderungen. Diese Beobachtungen bestätigt der Signifikanztest, $\chi^2(2) = .88$; $p = .65$, mit einer Effektgröße von $\omega = .14$ und einer Teststärke $1-\beta = .12$.

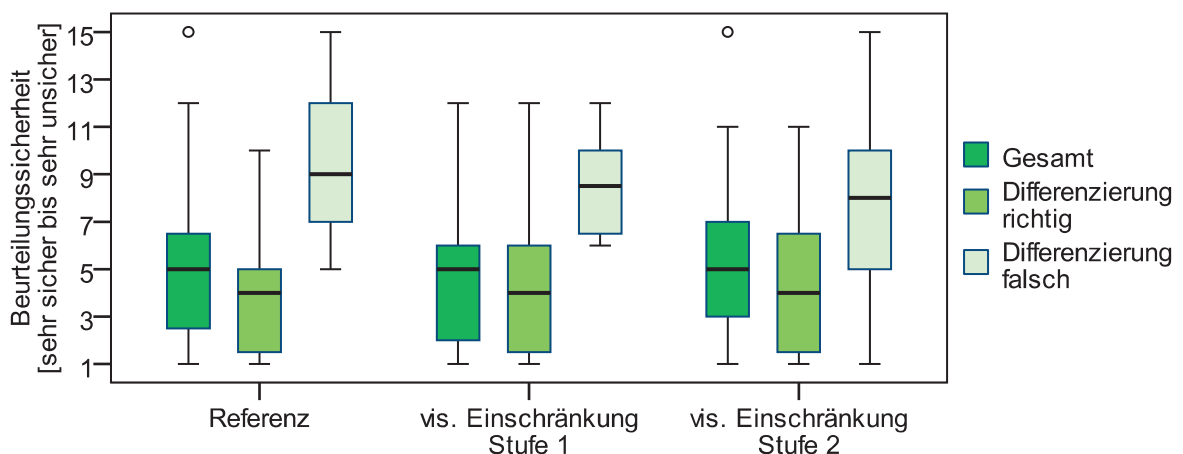


Abbildung 4-8: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Lenkungscharakteristik bei visueller Einschränkung (Gesamt: n = 46), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung

Der Abgleich der Bewertungen bei richtigen und falschen Entscheidungen lässt erkennen, dass im Fall einer richtigen Antwort im Mittel ein Wert von vier Punkten vergeben wird. Die Bewertung bei falschen Antworten liegt im Fall der Referenzfahrt bei neun Punkten und nimmt bis zur zweiten Stufe der Einschränkung um einen Bewertungspunkt auf acht ab. Insgesamt kann

¹⁰ Die Anzahl der Datensätze reduziert sich hier auf n = 46, da bei Fahrten mit Fahrfehlern, die ein Verlassen der Versuchsstrecke zur Folge haben, keine Daten erhoben werden.

von einer Annäherung der Bewertungen bei richtigen und falschen Entscheidungen bei zunehmender Einschränkung gesprochen werden. Die Überlappung der Box im Fall der zweiten Stufe der Einschränkung bestätigt dies.

Tabelle 4-8 zeigt die **Differenzierungsfähigkeit** im Fall der akustischen Einschränkung. Diese nimmt, beginnend mit einem Wert von knapp 85 % bei der Referenzfahrt, gleichmäßig um ca. 9 % bis zur zweiten Stufe der Einschränkung ab. Ein signifikanter Effekt kann nicht beobachtet werden, $\chi^2(2) = 1.50$; $p = .47$. Der Effekt ist mit $\omega = .18$ als klein einzuschätzen, ebenso die Teststärke, $1-\beta = .28$.

Tabelle 4-8: Differenzierungsfähigkeit Lenkungscharakteristik, akust. Einschränkung, $n = 46$ ¹¹

	Anzahl richtig [-]	Anzahl falsch [-]	Differenzierungsfähigkeit [%]
Referenz	39	7	84,9
Einschränkung akust., Stufe 1	37	9	80,4
Einschränkung akust., Stufe 2	35	11	76,1

Die Analyse der **Beurteilungssicherheit** bei akustischer Einschränkung ergibt ein vergleichbares Ergebnis zum Versuchsteil mit visueller Einschränkung.

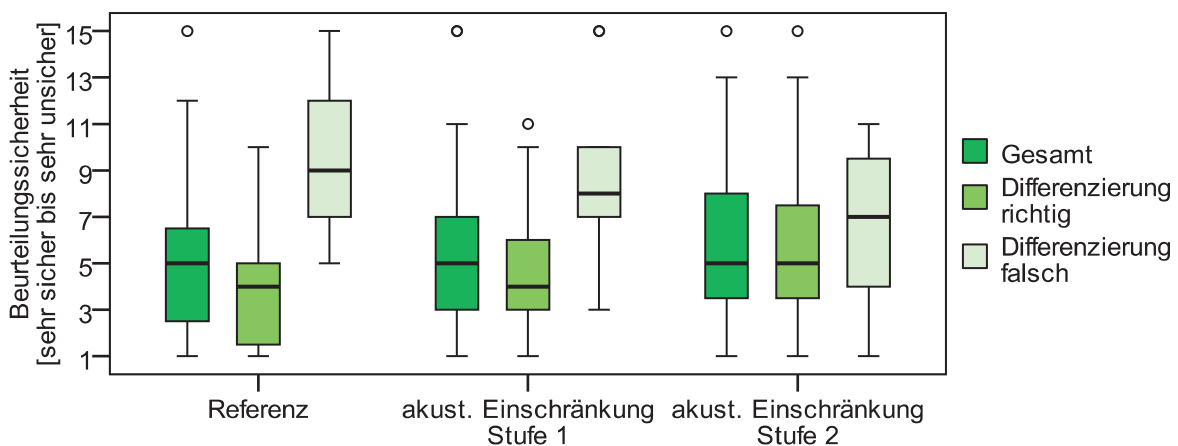


Abbildung 4-9: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Lenkungscharakteristik bei akustischer Einschränkung (Gesamt: $n = 46$), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung

¹¹ Wie bereits zuvor reduziert sich die Anzahl n der Datensätze auf 46, da Fahrten mit Fahrfehlern vorliegen, die ein Verlassen der Versuchsstrecke und damit den Ausschluss aus der Datenerhebung zur Folge haben.



Die Mediane der Bewertung liegen konstant beim Wert fünf, die Interquartilsabstände sind im Fall der Einschränkung nur leicht vergrößert. Folgerichtig führt die inferenzstatistische Überprüfung zu einem nicht signifikanten Ergebnis, $\chi^2(2) = 2.09$; $p = .35$, mit einer kleinen bis moderaten Effektgröße, $\omega = .21$, und geringer Teststärke, $1-\beta = .23$.

Abweichungen finden sich erst bei der Trennung nach richtigen und falschen Entscheidungen. Ist bei der Referenzfahrt noch eine klare Differenz in der Bewertung hinsichtlich des Medians und auch der Lage der Boxen zu erkennen, verschwimmt diese Spreizung bei stärkerer akustischer Einschränkung zusehends.

4.3.2.2 Objektive Daten der Versuchsreihe Querdynamik

4.3.2.2.1 Allgemeine Feststellungen

Insbesondere in der Versuchsreihe der Querdynamik können starke interindividuelle Unterschiede im Fahrerverhalten festgestellt werden. Bereits anhand der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit bei den Referenzfahrten, mit einer Spannbreite der Werte von rund 30 km/h, kann dies nachvollzogen werden, vgl. Abbildung 4-10.

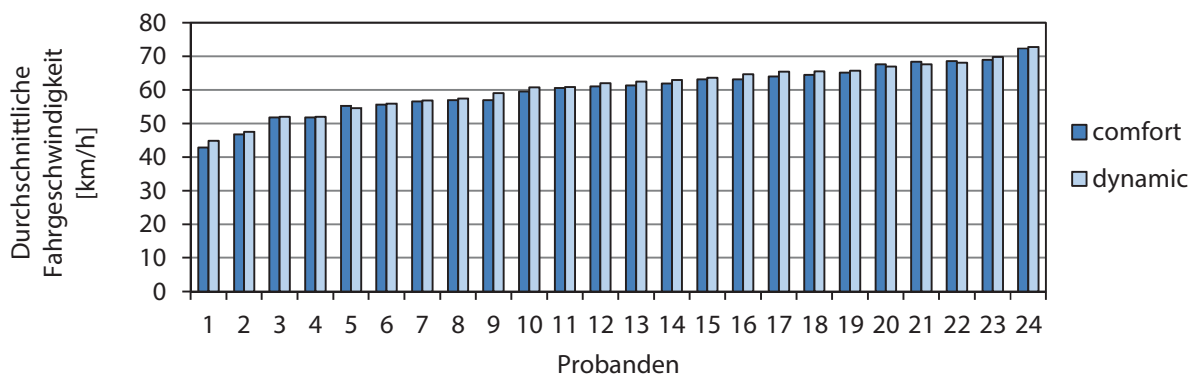
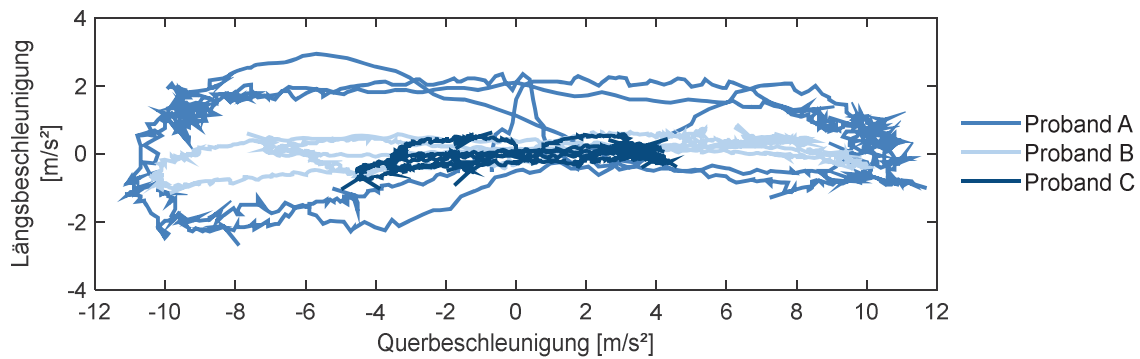


Abbildung 4-10: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit der Referenzfahrten aller 24 Probanden – Stufen comfort und dynamic des Faktors Lenkungscharakteristik

Weiterhin ersichtlich sind diese Differenzen in der Ausnutzung des längs- und querdynamischen Potentials des Fahrzeugs. Abbildung 4-11 verdeutlicht dies am Beispiel dreier Probanden mit heterogenem Fahrerverhalten.

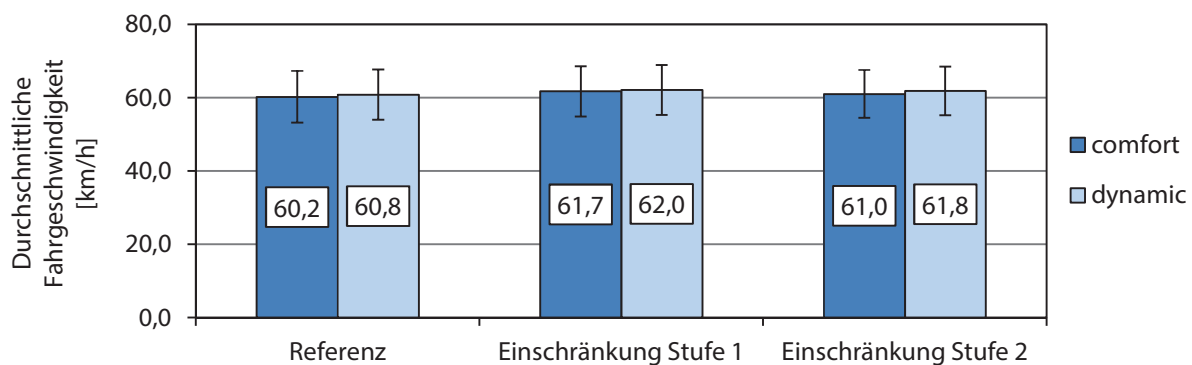


Abbildungung 4-11: Darstellung der Längsbeschleunigung über der Querbeschleunigung bei drei exemplarischen Referenzfahrten verschiedener Probanden

Die äußerste Linie, Proband A, bildet den Verlauf eines Fahrers ab, der auch bei hohen Querbeschleunigungen während der Kurvenfahrt zusätzliche Längsbeschleunigungen aufbringt und sich somit im Bereich der Haftreibungsgrenze des Reifens befindet. Proband B überschreitet querdynamisch ebenfalls 10 m/s^2 , verzichtet aber auf größere Beschleunigungsphasen oder Bremsungen. Proband C erreicht weder quer- noch längsdynamisch hohe Beschleunigungswerte.

4.3.2.2.2 Versuchsteil 1 (Faktor akust. Einschränkung): Kennwerte der Bahnführungsebene

Die akustische Einschränkung führt in erster Stufe zur Erhöhung der **Fahrgeschwindigkeit**, in zweiter Stufe kann keine weitere Steigerung, sondern ein leichter Rückgang beobachtet werden. Die Varianzanalyse weist für diesen Faktor ein signifikantes Ergebnis aus, $F(2; 46) = 6.91$; $p = .002$; $\eta_p^2 = .23$; $1-\beta = 1.0$. Im paarweisen Vergleich weichen die Ergebnisse zwischen den Referenzfahrten und der ersten Stufe der Einschränkung signifikant voneinander ab, $p = .003$. Die Fahrten im Modus dynamic werden durchgängig mit höherer Fahrgeschwindigkeit absolviert, dies ist signifikant verschieden zur Einstellung comfort, $F(1; 23) = 8.07$; $p = .009$; $\eta_p^2 = .26$; $1-\beta = 1.0$.



Abbildungung 4-12: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei akust. Einschränkung, $n = 24$



Die Betrachtung der **minimalen Längsbeschleunigung** lässt keine größeren Abweichungen erkennen. Dies bestätigt die inferenzstatistische Analyse für den Faktor der akustischen Einschränkung, $F(2; 46) = 1.52$; $p = .23$; $\eta_p^2 = .06$; $1-\beta = .99$, ebenso wie für den Faktor der Lenkungscharakteristik, $F(1; 23) = .72$; $p = .41$; $\eta_p^2 = .03$; $1-\beta = .79$.

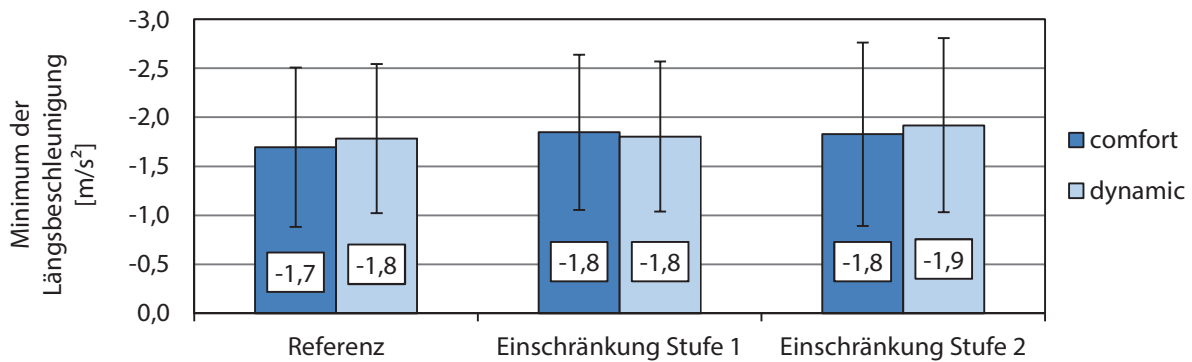


Abbildung 4-13: Minimum der Längsbeschleunigung bei akust. Einschränkung, $n = 24$

Die **durchschnittlichen Querbeschleunigungen** steigen zwischen den Referenzfahrten und der ersten Stufe der akustischen Einschränkung an, halten dann bei weiterer Zunahme der Einschränkung in etwa das erhöhte Niveau. Die Steigerung ist hochsignifikant, $F(2; 46) = 9.09$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .28$; $1-\beta = 1.0$. Folgerichtig finden die Post-Hoc-Tests signifikante Unterschiede zwischen der Referenzfahrt und der ersten Stufe, $p < .001$, sowie der zweiten Stufe der Einschränkung, $p = .04$. Auch beim Faktor der Lenkungscharakteristik ist die Differenz zwischen den Stufen dynamic und comfort als signifikant zu betrachten, $F(1; 23) = 6.03$; $p = .02$. Die Effektstärke ist dabei hoch, $\eta_p^2 = .21$, die Teststärke mit $1-\beta = 1.0$ maximal.

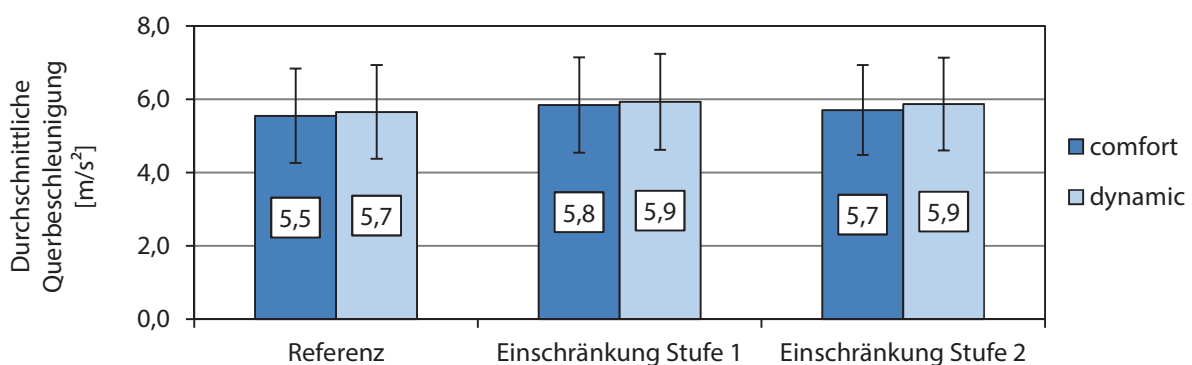


Abbildung 4-14: Durchschnittliche Querbeschleunigung bei akust. Einschränkung, $n = 24$

Die Einschränkung des Hörvermögens bedingt eine Zunahme der **maximal auftretenden Querbeschleunigungen**. Im Fall der dynamic-Stufe der Lenkung ist dies ein kontinuierlicher Trend, bei der Einstellung comfort ein Anstieg von der Referenzfahrt hin zu den identischen Werten der ersten und zweiten Stufe. Der Faktor der Einschränkung wirkt sich dabei insgesamt

signifikant auf den Kennwert aus, $F(2; 46) = 3.77$; $p = .03$; $\eta_p^2 = .14$; $1-\beta = 1.0$. Allerdings zeigen die paarweisen Vergleiche keine als signifikant zu bewertenden Differenzen an. Die Lenkungscharakteristik besitzt wiederum signifikanten Einfluss auf das Ergebnis, $F(1; 23) = 4.36$; $p = .05$; $\eta_p^2 = .16$; $1-\beta = 1.0$.

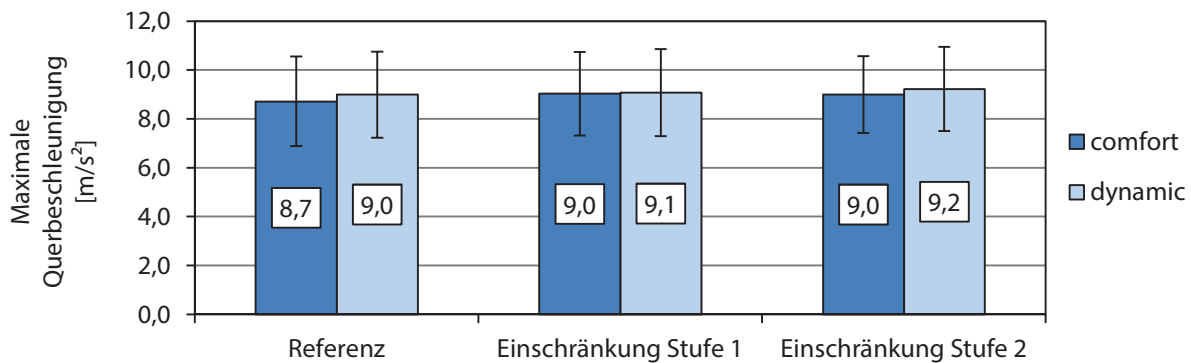


Abbildung 4-15: Maximale Querbeschleunigung bei akust. Einschränkung, n = 24

Für den Kennwert der **Giergeschwindigkeit** werden bei den Referenzfahrten die niedrigsten Messwerte ermittelt, bei der ersten Verminderung des Hörvermögens erfolgt eine Steigerung, bei weiterer Einschränkung dann eine leichte Reduktion. Die Varianzanalyse ergibt ein hochsignifikantes Ergebnis, $F(2; 46) = 9.21$; $p < .001$, mit sehr großem Effekt von $\eta_p^2 = .29$. Die Teststärke wird maximal, $1-\beta = 1.0$. Die Post-Hoc-Tests weisen die Unterschiede zwischen der Referenzfahrt und der ersten Stufe, $p < .001$, sowie der zweiten Stufe, $p = .03$, als signifikant aus. Auch bei diesem Kennwert wird eine signifikante Abhängigkeit der Ergebnisse vom Faktor der Lenkungscharakteristik ersichtlich, $F(1; 23) = 7.46$; $p = .01$; $\eta_p^2 = .25$; $1-\beta = 1.0$.

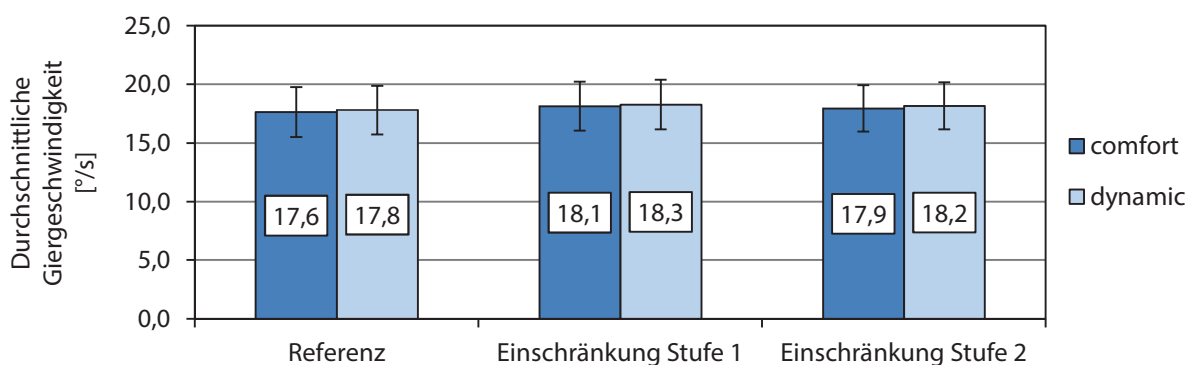


Abbildung 4-16: Durchschnittliche Giergeschwindigkeit bei akust. Einschränkung, n = 24



4.3.2.2.3 Versuchsteil 1 (Faktor akust. Einschränkung): Kennwerte der Stabilisierungsebene

Die **durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit** steigt von der Referenzfahrt hin zu den beiden Fahrten mit akustischer Einschränkung an. Zwischen diesen sind nur geringe Abweichungen erkennbar. Das Ergebnis des Mittelwertvergleichs ist signifikant, $F(2; 46) = 7.73$; $p = .001$; $\eta_p^2 = .25$; $1-\beta = 1.0$. Wie bereits die grafische Überprüfung vermuten lässt, unterscheidet sich die Stufe der Referenzfahrten signifikant zu der ersten Stufe der akustischen Einschränkung, $p = .006$, wie auch der zweiten Stufe, $p = .01$. Zusätzlich besitzt der Faktor der Lenkungscharakteristik einen signifikanten Einfluss auf diesen Kennwert, $F(1; 23) = 4.66$; $p = .04$; $\eta_p^2 = .17$; $1-\beta = 1.0$.

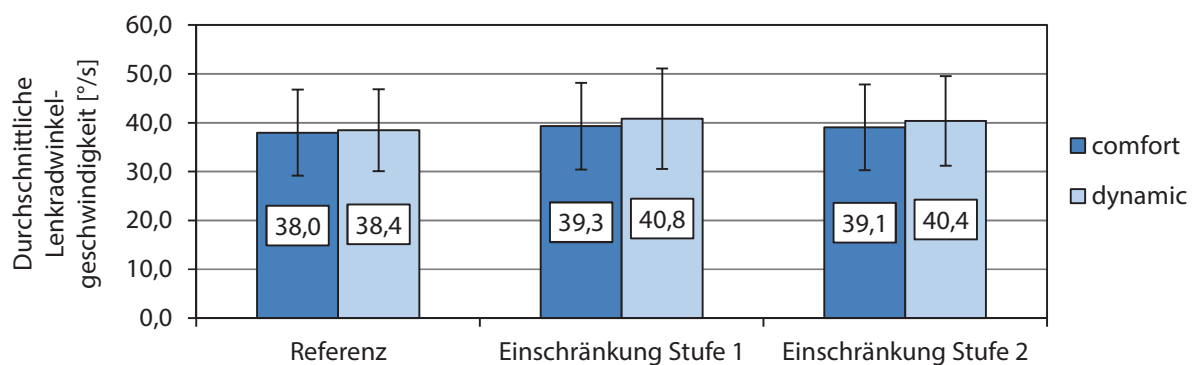


Abbildung 4-17: Durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei akust. Einschränkung, $n = 24$

Bei der **Standardabweichung des Lenkradwinkels** kann für den Faktor der akustischen Einschränkung ein vergleichbares Bild festgestellt werden. Allerdings sind die auftretenden Gruppenunterschiede geringer und damit nicht signifikant verschieden, $F(2; 46) = 2.44$; $p = .10$. Der Effekt kann als mittelgroß bezeichnet werden, $\eta_p^2 = .10$, die Teststärke der Varianzanalyse ist für diesen Faktor maximal groß, $1-\beta = 1.0$. Die Analyse des Faktors Lenkung bestätigt eine hochsignifikante Steigerung der Werte bei Verwendung der dynamic-Stufe, $F(1; 23) = 25.0$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .52$; $1-\beta = 1.0$.

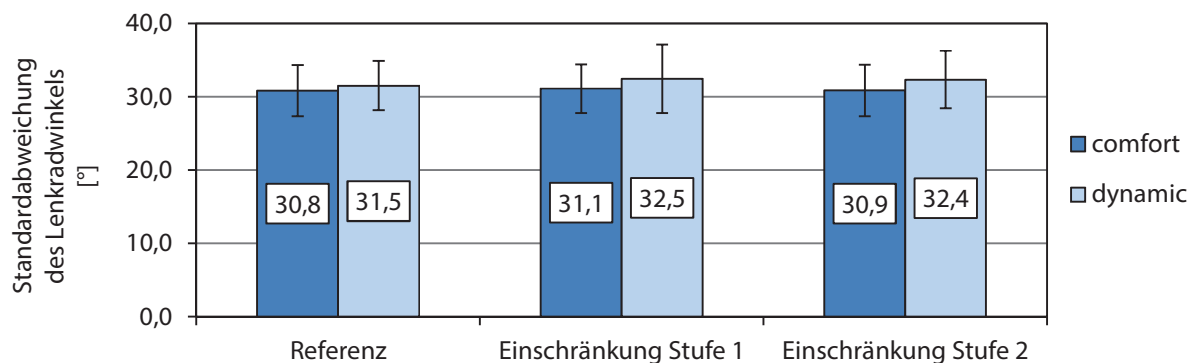


Abbildung 4-18: Standardabweichung des Lenkradwinkels bei akust. Einschränkung, $n = 24$

Die **maximal gemessenen Lenkradwinkel** der Stufe comfort bleiben hinter denen der Stufe dynamic zurück. Dies ist allerdings nicht als statistisch signifikant anzusehen, $F(1; 23) = 3.47$; $p = .08$; $\eta_p^2 = .13$; $1-\beta = 1.0$. Die Auswirkungen der akustischen Einschränkung in der Stufe comfort folgen einem ansteigenden Trend mit einer deutlichen Steigerung zwischen der Referenz und den beiden weiteren Stufen. Im Fall der dynamic-Einstellung ist dies ebenfalls festzustellen, allerdings mit höheren Werten bei der ersten Stufe der Einschränkung als in der zweiten Stufe. Die Varianzanalyse ergibt ein signifikantes Ergebnis, $F(1.7; 39.2) = 4.06$; $p = .03$; $\eta_p^2 = .15$; $1-\beta = 1.0$. Zur Berechnung wurde die Korrektur nach Huynh-Feldt angewandt, $\epsilon = .85$. Die anschließenden paarweisen Vergleiche zeigen eine signifikante Differenz nur zwischen der Referenzstufe und der zweiten Stufe der Einschränkung, $p = .01$, nicht jedoch zwischen den Referenzfahrten und der ersten Stufe, $p = .06$.

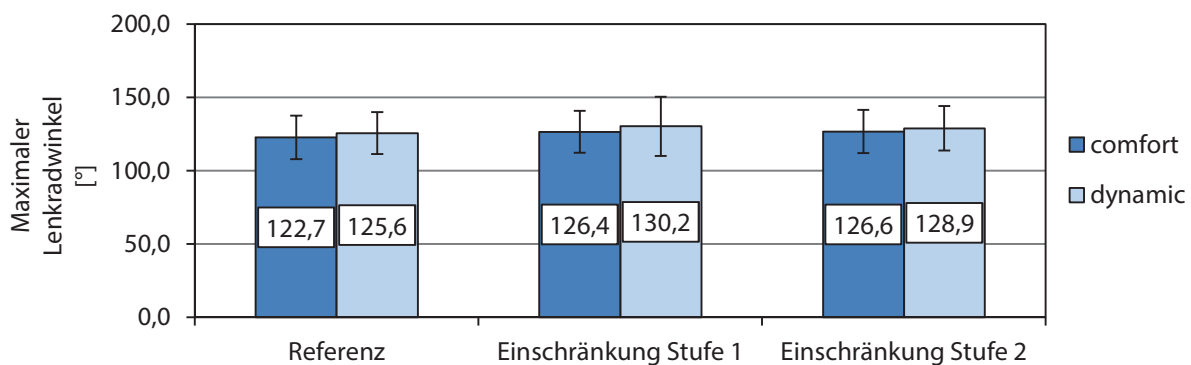


Abbildung 4-19: Maximaler Lenkradwinkel bei akust. Einschränkung, $n = 24$

Die Datenanalyse des **Lenkfrequenzverhältnisses** weist in der comfort-Einstellung einen ansteigenden Trend auf, wie zuvor wird dies in der dynamic-Stufe aber nicht bestätigt. Dort bilden die Werte der ersten Stufe der akustischen Einschränkung das Maximum. Weiterhin auffällig ist eine hohe Streuung der Ergebnisse, die auch mit einer Verletzung der Normalverteilungsannahme in Zusammenhang steht.

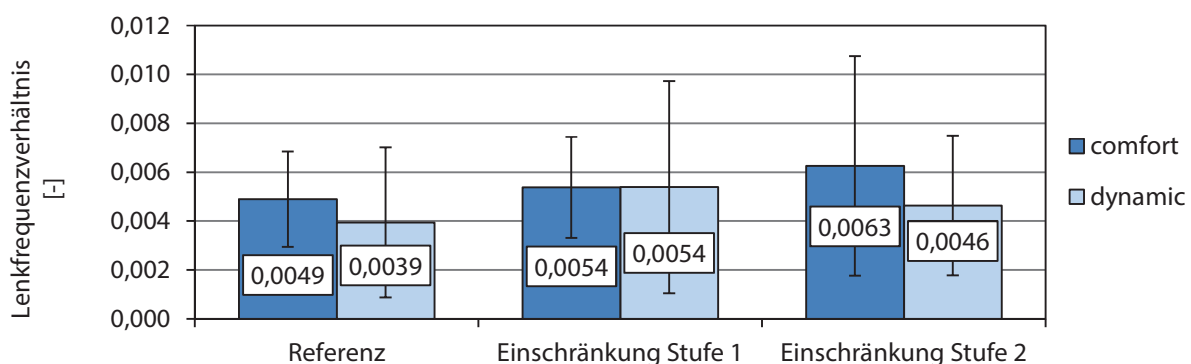


Abbildung 4-20: Lenkfrequenzverhältnis bei akust. Einschränkung, $n = 24$



Der Faktor der akustischen Einschränkung führt zu einem signifikanten Ergebnis der Varianzanalyse, $F(2; 46) = 3.20$; $p = .05$; $\eta_p^2 = .12$; $1-\beta = .99$, die paarweisen Vergleiche zeigen aber keine signifikant verschiedenen Faktorstufen. Gleichmaßen ist kein Einfluss der Lenkungscharakteristik erkennbar, $F(1; 23) = 2.98$; $p = .10$; $\eta_p^2 = .12$; $1-\beta = .89$.

Die Erläuterungen zur Bewertung der **Lenkrückstellrate** decken sich mit den zuvor erwähnten Punkten des Lenkfrequenzverhältnisses. In der Stufe comfort kann bei zunehmender Einschränkung ein kontinuierlicher Anstieg beobachtet werden, in der Einstellung dynamic ist dies nicht der Fall. Zudem erschwert eine Verletzung der Normalverteilungsannahme bei hoher Variabilität innerhalb der Gruppen die Bewertung des Ergebnisses. Signifikanzen treten nicht auf, $F(2; 46) = 2.09$; $p = .14$; $\eta_p^2 = .08$; $1-\beta = .97$. Gleiches gilt für den Faktor der Lenkungscharakteristik, $F(1; 23) = 2.45$; $p = .13$; $\eta_p^2 = .10$; $1-\beta = .92$.

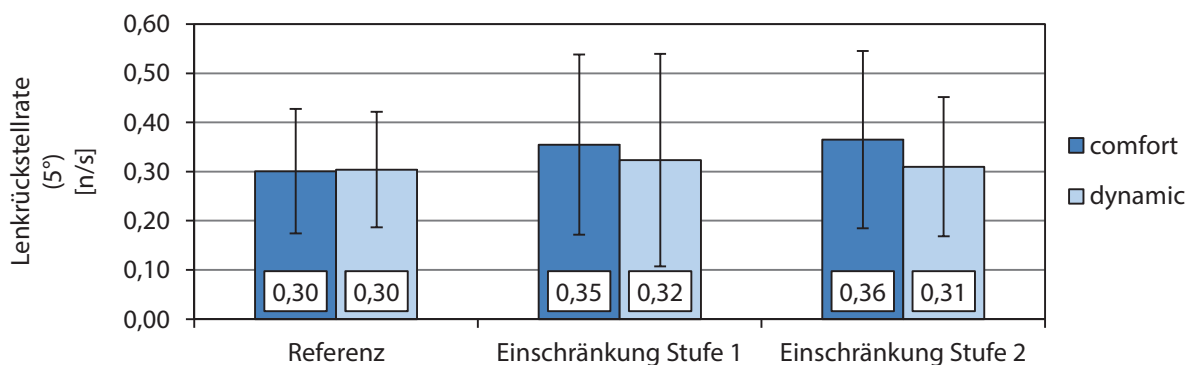


Abbildung 4-21: Lenkrückstellrate (5°) bei akust. Einschränkung, $n = 24$

4.3.2.2.4 Versuchsteil 2 (Faktor vis. Einschränkung): Kennwerte der Bahnführungsebene

Im zweiten Versuchsteil mit visueller Einschränkung beträgt die **durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit** bei den Referenzfahrten etwas über 60 km/h. Über die Stufe 1 und Stufe 2 der visuellen Einschränkung hinweg ist eine Abnahme nachvollziehbar.

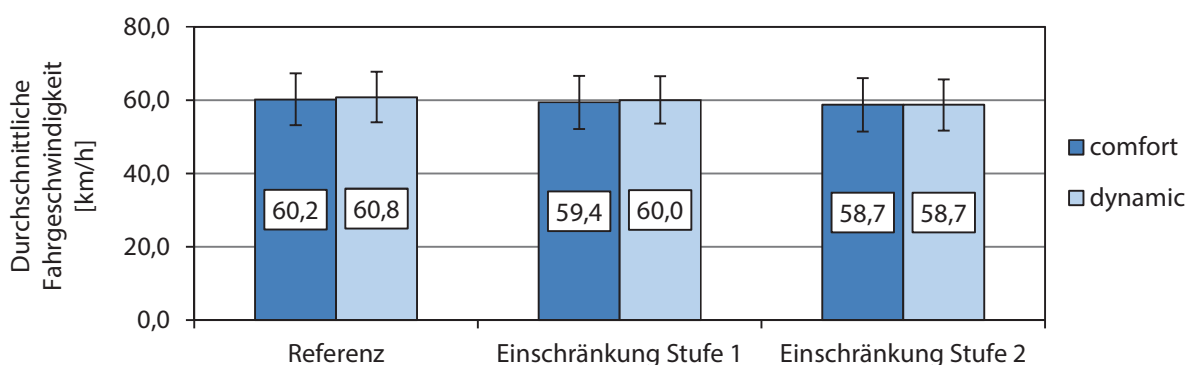


Abbildung 4-22: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei visueller Einschränkung, $n = 24$

Dieser Effekt der Einschränkung ist mit $\eta_p^2 = .30$ sehr groß, es zeigt sich ein hochsignifikanter Unterschied der Varianzanalyse, $F(2; 46) = 9.78$; $p < .001$, mit maximaler Teststärke, $1-\beta = 1.0$. Der paarweise Vergleich bestätigt einen hochsignifikanten Unterschied zwischen der Referenzfahrt und der zweiten Stufe der Einschränkung, $p < .001$. Die erste Stufe weicht von den beiden anderen Versuchsbedingungen nicht signifikant ab. Der Faktor der Lenkungscharakteristik besitzt bei moderatem Effekt $\eta_p^2 = .06$ keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis, $F(1; 23) = 1.36$; $p = .26$; $1-\beta = 1.0$.

Die Analyse des **Minimums der Längsbeschleunigung** ergibt über die Faktorstufen hinweg weitgehend gleichbleibende Werte mit hohen Standardabweichungen. Die Differenzen innerhalb des Faktors der visuellen Einschränkung besitzen keine statistische Relevanz, $F(2; 46) = .52$; $p = .60$; $\eta_p^2 = .02$; $1-\beta = .54$. Der Faktor der Lenkungscharakteristik führt ebenfalls zu keiner Veränderung der Werte, $F(1; 23) = 2.26$; $p = .15$; $\eta_p^2 = .09$; $1-\beta = .99$.

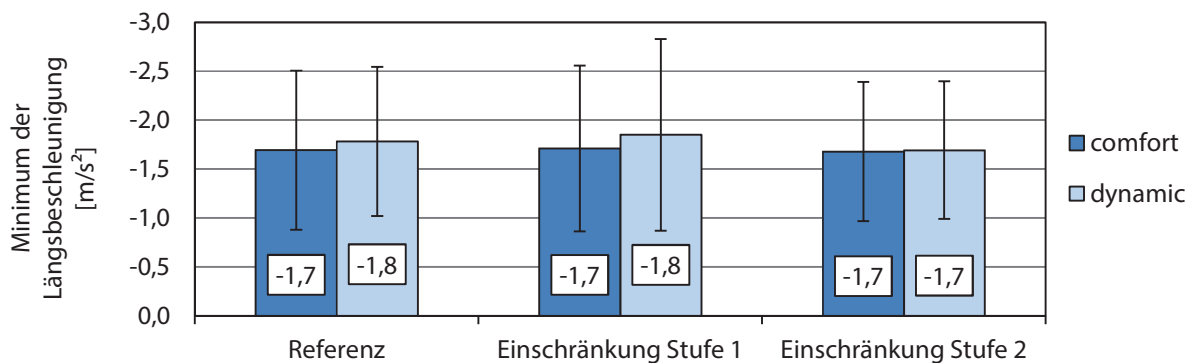


Abbildung 4-23: Minimum der Längsbeschleunigung bei visueller Einschränkung, $n = 24$

Vergleichbar mit der Fahrgeschwindigkeit gehen auch die Werte der **durchschnittlichen Querbeschleunigung** bei zunehmender visueller Einschränkung zurück. Die Varianzanalyse mit $F(2; 46) = 6.81$; $p = .003$ ist für diesen Faktor signifikant, der paarweise Vergleich weist einen hochsignifikanten Unterschied zwischen der Referenzfahrt und der stärkeren Stufe der Einschränkung aus, $p < .001$.

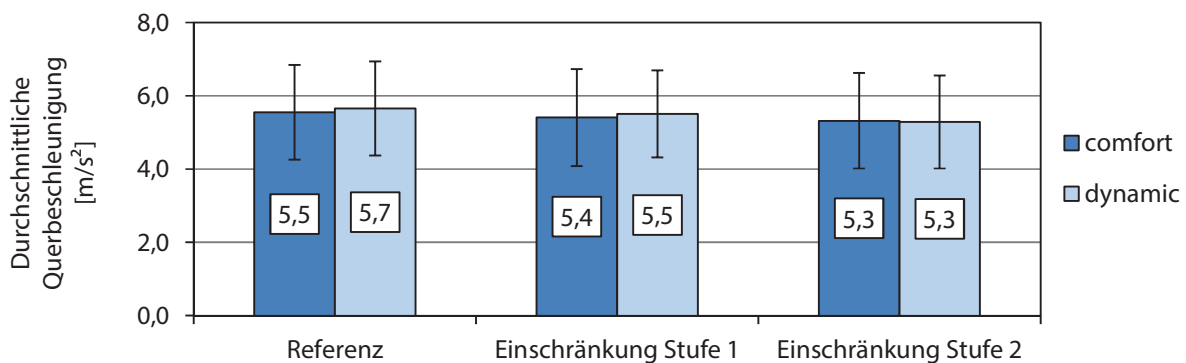


Abbildung 4-24: Durchschnittliche Querbeschleunigung bei visueller Einschränkung, $n = 24$



Der ermittelte Effekt $\eta_p^2 = .23$ ist als sehr groß zu bezeichnen, die Teststärke mit $1-\beta = 1.0$ als maximal. Dies liegt auch in den hohen Korrelationen zwischen den Faktorstufen begründet, $\bar{r} = .93$. Eine signifikante Auswirkung des Faktors Lenkungscharakteristik ist nicht festzustellen, $F(1; 23) = .47$; $p = .50$. Der gefundene Effekt $\eta_p^2 = .02$ ist als klein einzustufen, die Teststärke $1-\beta = .93$ liegt aber auf sehr hohem Niveau.

Auch hinsichtlich der **Maximalwerte der Querbeschleunigung** kann der beschriebene Trend beobachtet werden. Die höchsten Beschleunigungen finden sich bei der Referenzfahrt, danach folgt ein Rückgang. Die Varianzanalyse zeigt ein hochsignifikantes Ergebnis für den Faktor der visuellen Einschränkung, $F(2; 46) = 9.24$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .29$; $1-\beta = 1.0$. Die paarweisen Vergleiche bestätigen einen Unterschied der Referenzfahrt zur ersten Stufe der Einschränkung, $p = .02$, und der Referenzfahrt zur zweiten Stufe, $p < .001$. Beim Faktor der Lenkungscharakteristik sind die Ergebnisse der Stufen comfort und dynamic als gleichwertig anzusehen, $F(1; 23) = 2.21$; $p = .15$; $\eta_p^2 = .09$; $1-\beta = 1.0$.

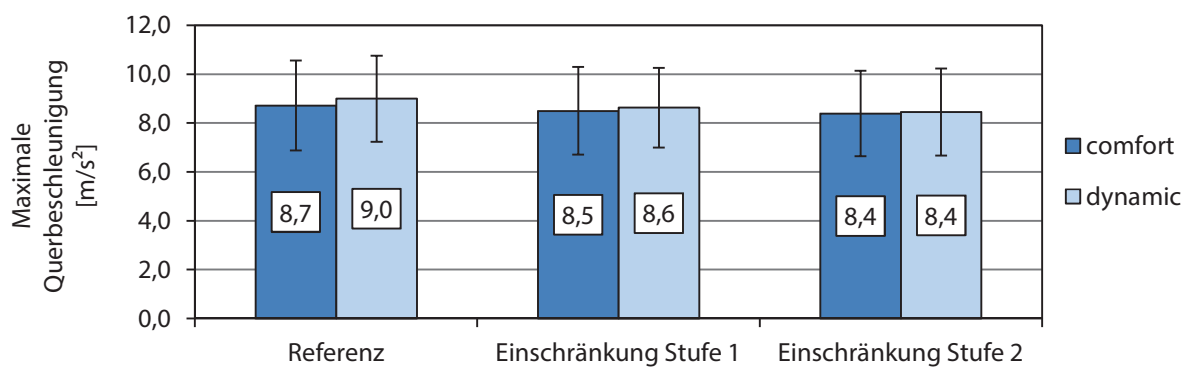


Abbildung 4-25: Maximale Querbeschleunigung bei visueller Einschränkung, $n = 24$

Die Sichteinschränkung wirkt sich hochsignifikant auf die **durchschnittliche Giergeschwindigkeit** aus, $F(2; 46) = 6.14$; $p = .004$ mit $\eta_p^2 = .21$ und $1-\beta = 1.0$. Dabei nehmen die Werte von der Referenzfahrt hin zur zweiten Stufe der Einschränkung kontinuierlich ab.

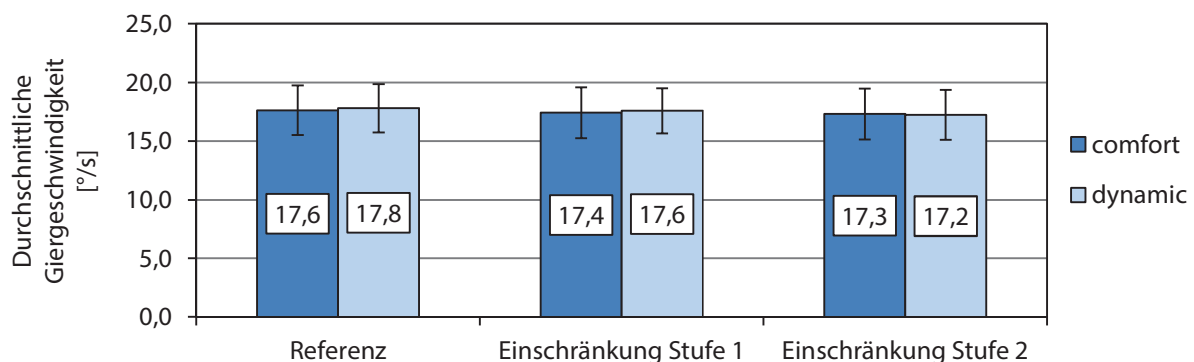


Abbildung 4-26: Durchschnittliche Giergeschwindigkeit bei visueller Einschränkung, $n = 24$



Die Post-Hoc-Tests belegen den hochsignifikanten Unterschied zwischen diesen beiden Stufen, $p = .003$, weitere signifikante Differenzen finden sich nicht. Die Prüfung des Faktors Lenkungscharakteristik verläuft ohne signifikantes Ergebnis, $F(1; 23) = .52$; $p = .48$, mit kleinem Effekt, $\eta_p^2 = .02$, und hoher Teststärke, $1-\beta = .95$.

4.3.2.2.5 Versuchsteil 2 (Faktor vis. Einschränkung): Kennwerte der Stabilisierungsebene

Vergleichbar mit einigen Kennwerten auf Bahnführungsebene ist auch bei der Analyse der **durchschnittlichen Lenkradwinkelgeschwindigkeit** als Kennwert der Stabilisierungsebene ein Rückgang der Werte von der Referenzfahrt zu den Fahrten mit Sichteinschränkung erkennbar. Für diesen Faktor zeigt die Varianzanalyse ein hochsignifikantes Ergebnis an, $F(2; 46) = 6.48$; $p = .003$; $\eta_p^2 = .22$; $1-\beta = 1.0$. Der paarweise Vergleich präzisiert das Resultat, der signifikante Unterschied besteht zwischen der Referenzfahrt und der zweiten Stufe der visuellen Einschränkung, $p = .003$. Der Faktor Lenkungscharakteristik zeigt minimal höhere Werte in der Stufe dynamic, ohne aber bei der Varianzanalyse eine signifikante Differenz zu ergeben, $F(1; 23) = .53$; $p = .48$; $\eta_p^2 = .02$; $1-\beta = .90$.

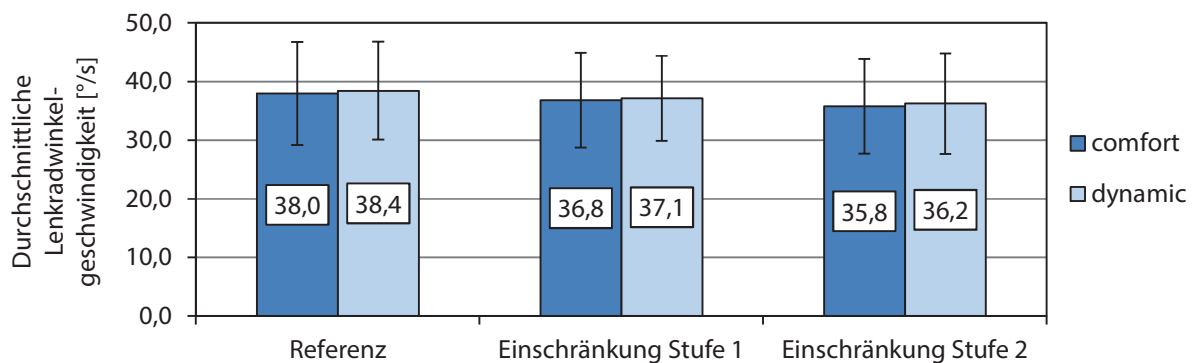


Abbildung 4-27: Durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei visueller Einschränkung, $n = 24$

Eine geringe Abnahme der Werte von der Referenz hin zu den beiden Stufen der Sichteinschränkung ist auch in Bezug auf die **Standardabweichung des Lenkradwinkels** bemerkbar. Aus diesen Mittelwertunterschieden folgt ebenfalls ein hochsignifikantes Ergebnis, $F(2; 46) = 5.89$; $p = .005$; $\eta_p^2 = .20$; $1-\beta = 1.0$. Die Post-Hoc-Tests lassen erkennen, dass ausschließlich zwischen der Referenzstufe und der Stufe 2 der visuellen Einschränkung ein signifikanter Unterschied besteht, $p = .003$. Beim Faktor der Lenkungscharakteristik liegen die Werte der Stufe dynamic bei allen Fahrten über dem Niveau der Stufe comfort, dies ist als hochsignifikant anzusehen, $F(1; 23) = 11.72$; $p = .002$. Der Effekt ist dabei sehr groß, $\eta_p^2 = .34$, mit maximaler Teststärke, $1-\beta = 1.0$.

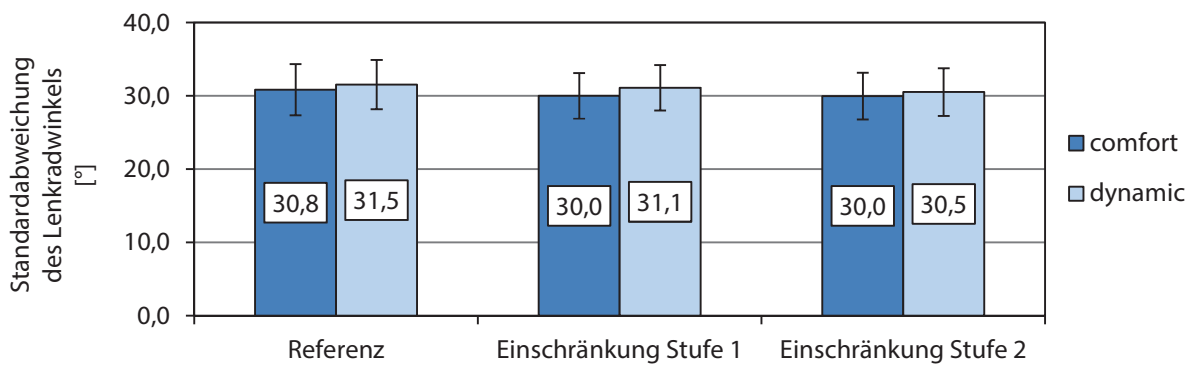


Abbildung 4-28: Standardabweichung des Lenkradwinkels bei visueller Einschränkung, n = 24

Der Eindruck der vorangegangenen Analysen bleibt in Bezug auf den **maximalen Lenkradwinkel** erhalten. Die Werte nehmen von der Referenzfahrt hin zur zweiten Stufe der visuellen Einschränkung kontinuierlich ab, die Faktorstufe dynamic der Lenkungscharakteristik führt zu höheren Werten als die Variante comfort. Der Faktor der visuellen Einschränkung lässt dabei ein hochsignifikantes Resultat erkennen, $F(2; 46) = 6.32$; $p = .004$; $\eta_p^2 = .22$; $1-\beta = 1.0$. Im paarweisen Vergleich weichen aber wie zuvor nur die Referenzfahrten und die Fahrten der zweiten Stufe signifikant voneinander ab, $p = .006$. Der kleinere Effekt des Faktors Lenkungscharakteristik, $\eta_p^2 = .10$, führt zu keinerlei signifikanten Unterschieden, $F(1; 23) = 2.67$; $p = .12$; $1-\beta = 1.0$.

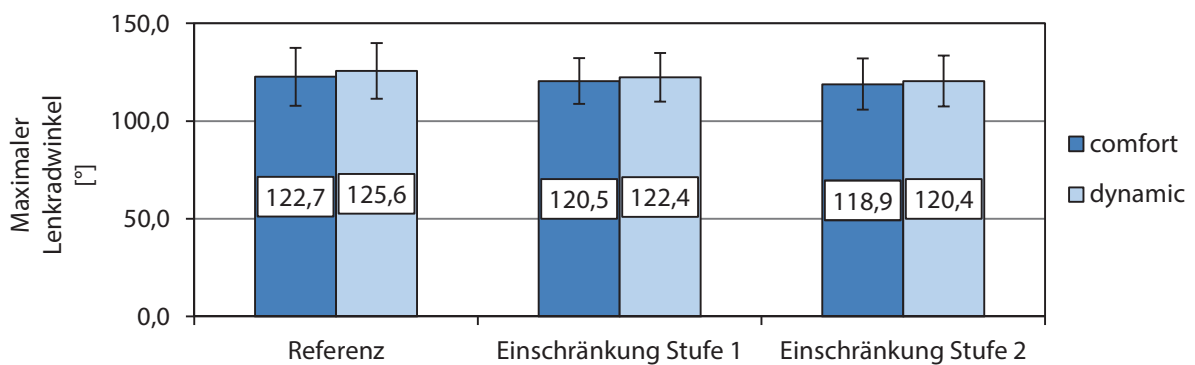


Abbildung 4-29: Maximaler Lenkradwinkel bei visueller Einschränkung, n = 24

Ein verändertes Bild bringt die Analyse des **Lenkfrequenzverhältnisses** mit sich. Für die Auswirkung des Faktors der visuellen Einschränkung lassen sich keine klaren Tendenzen ableiten. In der ersten Stufe der Einschränkung steigen die Werte an, um dann in zweiter Stufe unterhalb des Referenzniveaus abzusinken. Auch bei der inferenzstatistischen Bewertung finden sich keine eindeutigen Abweichungen, $F(2; 46) = 2.51$; $p = .09$; $\eta_p^2 = .10$; $1-\beta = .94$. Bei der Betrachtung der Faktorstufen der Lenkungscharakteristik zeigt sich dagegen ein klarer Rückgang des Kennwerts in der Einstellung dynamic. Dieser ist als signifikant anzusehen, $F(1; 23) = 5.94$; $p = .02$; $\eta_p^2 = .21$; $1-\beta = 1.0$.

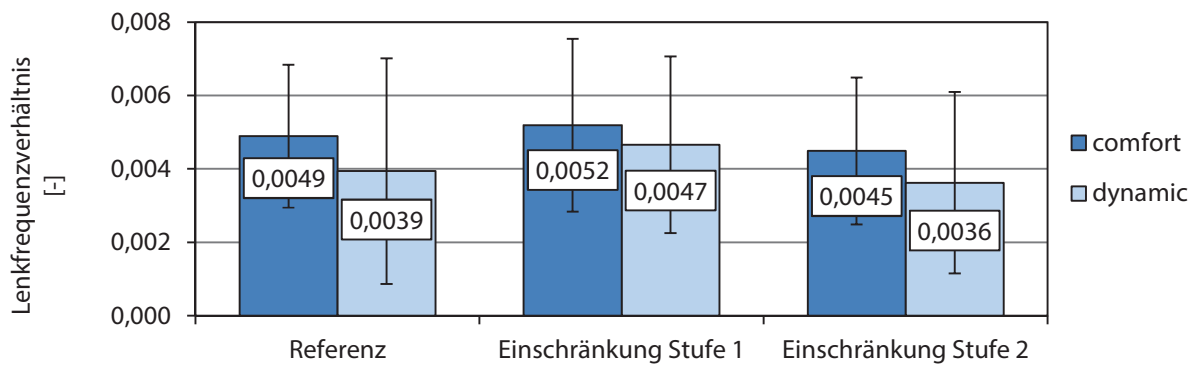


Abbildung 4-30: Lenkfrequenzverhältnis bei visueller Einschränkung, n = 24

Die Bewertung der **Lenkrückstellrate** wird durch eine deutliche Differenz zwischen der comfort- und dynamic-Stufe ausschließlich in Stufe 1 der visuellen Einschränkung erschwert. Im Fall der comfort-Einstellung der Lenkungscharakteristik liegt der Wert deutlich höher, bei der Stufe dynamic dagegen niedriger im Vergleich zu den Ergebnissen der anderen Fahrten. Die visuelle Einschränkung als Faktor der Varianzanalyse hat keinen signifikanten Einfluss, $F(2; 46) = .84$; $p = .44$; $\eta_p^2 = .04$. Der Wert der Teststärke $1-\beta$ beträgt .49. Der Faktor Lenkungscharakteristik ergibt ein signifikantes Ergebnis, $F(1; 23) = 5.69$; $p = .03$; $\eta_p^2 = .20$; $1-\beta = 1.0$. Dieses ist jedoch nur eingeschränkt interpretierbar, da es ausschließlich auf die große Differenz in der ersten Stufe der visuellen Einschränkung zurückzuführen ist. In den anderen Stufen findet sich kein bzw. sogar ein leicht gegenläufiger Effekt.

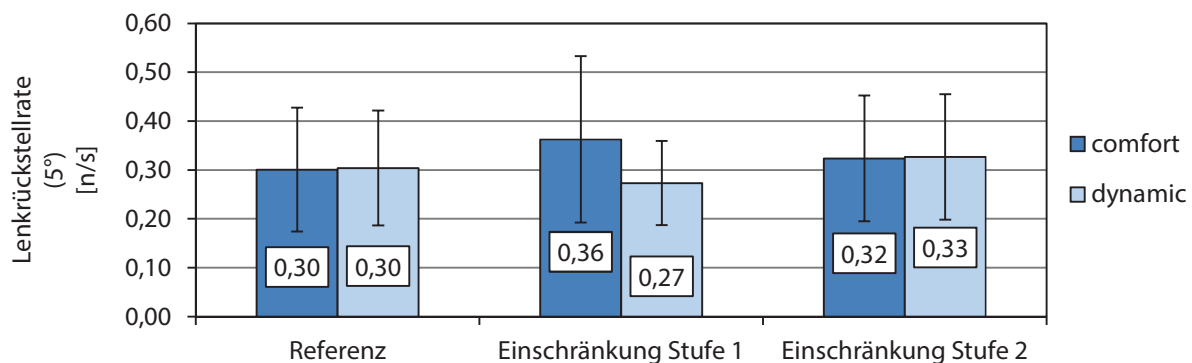


Abbildung 4-31: Lenkrückstellrate (5°) bei visueller Einschränkung, n = 24

4.3.3 Ergebnisse Vertikaldynamik

Die Ergebnisdarstellung der Versuchsreihe der Vertikaldynamik beschreibt die Werte der Differenzierungsfähigkeit und Beurteilungssicherheit sowie als objektive Größe die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit.



4.3.3.1 Subjektive Daten der Versuchsreihe Vertikaldynamik

Im Gegensatz zur **Differenzierungsfähigkeit** der Versuchsreihen zur Längs- und Querdynamik mit Werten um ca. 80 % findet sich beim Erkennen der Fahrwerkseinstellung ein deutlich verändertes Bild. Ohne Einschränkung werden noch knapp 60 % richtige Entscheidungen gefällt, bei der ersten Einschränkung sind dies nur noch knapp 40 %. Bei höchster Stufe steigt der Wert wieder auf ca. 55 % richtiger Beurteilungen an. Die Unterschiede sind mit $\chi^2(2) = 3.62$; $p = .16$; $\omega = .27$; $1-\beta = .51$ als nicht signifikant anzusehen.

Tabelle 4-9: Differenzierungsfähigkeit Fahrwerkscharakteristik, akust. Einschränkung, n = 48

	Anzahl richtig [-]	Anzahl falsch [-]	Differenzierungsfähigkeit [%]
Referenz	28	20	58,3
Einschränkung akust., Stufe 1	19	29	39,6
Einschränkung akust., Stufe 2	26	22	54,2

Die verringerte Differenzierungsfähigkeit der Probanden spiegelt sich auch in der empfundenen **Beurteilungssicherheit** wider, die Bewertungen erreichen deutlich höhere Werte als in den Versuchsreihen zuvor. Beim Vergleich der Mediane findet sich der höchste Wert von neun Punkten bei der Referenzfahrt, bei zunehmender akustischer Einschränkung fällt er auf acht Bewertungspunkte. Dieser geringe Unterschied ist statistisch nicht signifikant, $\chi^2(2) = 1.80$; $p = .41$; $\omega = .19$; $1-\beta = .21$. Die Größe des Interquartilsabstands nimmt zwischen Referenz und stärkster Einschränkung um zwei Punkte zu.

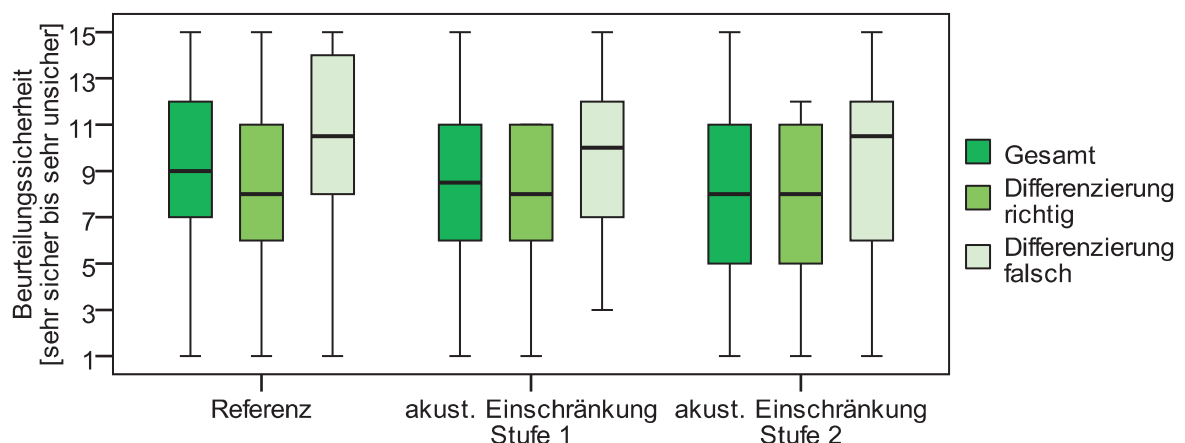


Abbildung 4-32: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Fahrwerkscharakteristik bei akustischer Einschränkung (Gesamt: n = 48), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung

Eine geringe Spreizung der Bewertung zwischen richtig und falsch differenzierten Fahrwerkeinstellungen ist vorhanden, bezüglich der Lage bzw. Überlappung der Boxen ist sie bei der Referenzfahrt am deutlichsten ausgeprägt.

4.3.3.2 Objektive Daten der Versuchsreihe Vertikaldynamik

Bei der **durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit** wird für die Faktorstufe comfort der Fahrwerkscharakteristik ein deutlicher Anstieg von der Referenzfahrt zu den Fahrten bei akustischer Einschränkung gemessen. Zwischen diesen beiden Stufen ist dagegen nur ein sehr kleiner Unterschied bemerkbar. Auch in der dynamic-Einstellung des Fahrwerks ist ein Anstieg von der Referenzfahrt hin zu den Fahrten mit akustischer Einschränkung zu verzeichnen, dieser fällt jedoch kleiner aus. Die höchste Fahrgeschwindigkeit wird bei der ersten Stufe der Einschränkung erreicht und fällt zur zweiten Stufe wieder um rund 1 km/h ab. Die Größe der Streuung erscheint über alle sechs Versuchsfahrten sehr ausgeglichen.

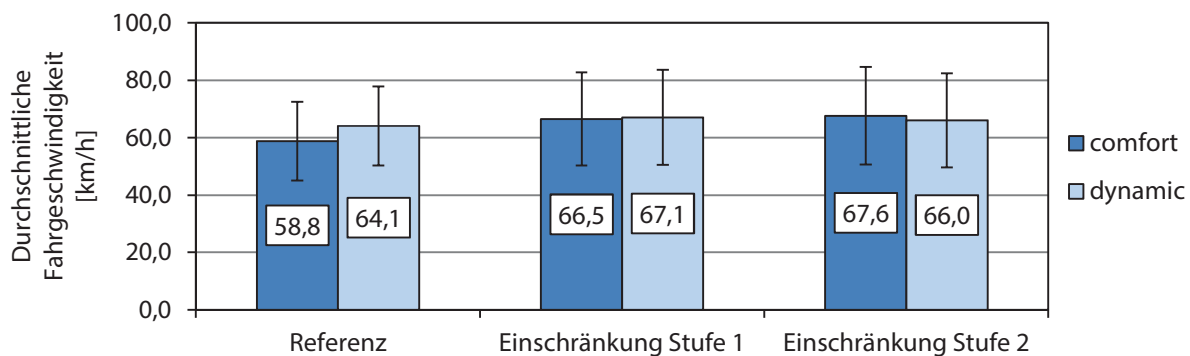


Abbildung 4-33: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei akust. Einschränkung, n = 24

Die Varianzanalyse der beiden Faktoren ergibt einen signifikanten Unterschied für den Faktor Fahrwerkscharakteristik, $F(1; 23) = 5.49$; $p = .03$; $\eta_p^2 = .19$; $1-\beta = 1.0$. Der Faktor der akustischen Einschränkung führt zu hochsignifikanten Abweichungen, $F(1.6; 36.5) = 9.51$; $p = .001$; $\eta_p^2 = .29$; $1-\beta = 1.0$. Die Verletzung der Sphärizitätsannahme wurde mittels dem Korrekturverfahren nach Huynh-Feldt ausgeglichen, $\epsilon = .79$. Post-Hoc-Tests weisen nach, dass die durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeiten der Referenzfahrten im Vergleich zur ersten Stufe, $p = .003$, wie auch zur zweiten Stufe der Einschränkung, $p = .01$, signifikant verschieden sind.

Zu berücksichtigen ist weiterhin ein hochsignifikanter Quereffekt der beiden Faktoren, $F(2; 46) = 10.29$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .31$. Die Fahrwerkscharakteristik in der comfort-Stufe begünstigt bei zunehmender akustischer Einschränkung steigende Fahrgeschwindigkeiten. Daraus lässt sich auch folgern, dass die zuvor gefundenen signifikanten Unterschiede im Faktor der akustischen Einschränkung hauptsächlich auf die Differenzen im comfort-Modus zurückzuführen sind.



4.4 Diskussion

Im Weiteren werden die aufgestellten Hypothesen wie auch die allgemeinen Fragestellungen beantwortet. Abschließend erfolgen mittels der Ergebnisse Gestaltungsempfehlungen für Fahr-simulatoren.

Symbolik zur Bewertung der Versuchshypothesen		
H0 zutreffend 	H0 nicht zutreffend 	Bewertung nicht möglich 

Abbildung 4-34: Symbolik zur Bewertung der Versuchshypothesen

Zur grafischen Veranschaulichung der Bewertung der Versuchshypothesen wird die Symbolik aus Abbildung 4-34 verwendet. Diese wird auch im weiteren Verlauf der Arbeit genutzt.

4.4.1 Subjektive Daten der Beurteilungsqualität

In der Versuchsreihe der Längsdynamik sind bei akustischer Einschränkung keine Auswirkungen auf die Erkennungsquote der Differenzierungsfähigkeit und den Median der Beurteilungssicherheit abzuleiten. Prinzipiell müssten zu den zugehörigen Hypothesen, vgl. Abbildung 4-35, jeweils die Nullhypothesen angenommen werden.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Längsdynamik			Bewertung
Faktor akustische Einschränkung			
Beurteilungsqualität	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Motorcharakteristik eines Fahrzeugs.	
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit negativ.	
	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Motorcharakteristik eines Fahrzeugs.	
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Beurteilungssicherheit negativ.	

Abbildung 4-35: Versuchsreihe Längsdynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten

In Folge der zu geringen Teststärken kann allerdings keine verallgemeinernde Aussage getroffen werden.

Die Bewertung in der Referenzstufe, also ohne Einschränkung, verdeutlicht, dass die Probanden bei einer richtigen Nennung der Motorcharakteristik ihre Entscheidung als sicherer empfinden.



Unsichere Entscheidungen sind dagegen mit einer höheren Fehlerrate verbunden. Dies ermöglicht die Interpretation, dass die Probanden bei uneingeschränkter Umgebungswahrnehmung über eine gute Selbsteinschätzung ihrer Bewertungsfähigkeit verfügen. Diese anfängliche Spreizung der Beurteilungssicherheit zwischen richtiger und falscher Differenzierung geht mit zunehmender akustischer Einschränkung verloren. Obwohl also am Absolutwert keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit erkannt werden kann, liefert diese Veränderung ein Indiz, dass sich die Qualität der Beurteilung verschlechtert.

Im Bereich der Querdynamik ergibt sich bei akustischer wie auch visueller Einschränkung ein nahezu identisches Bild. Wie bereits bei Wiedemann et al. (2014b) vorgestellt, können Veränderungen durch vermindertes Sehen oder Hören bei beiden Kennwerten, der Differenzierungsfähigkeit und der Beurteilungssicherheit, nicht festgestellt werden. Die deutlich zu gering ausfallende Teststärke verhindert aber auch hier eine Entscheidung in Richtung Null- oder Alternativhypothese. Somit können die zugehörigen Hypothesen, vgl. Abbildung 4-36 sowie Abbildung 4-37, auf Basis dieser Daten nicht geklärt werden.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Querdynamik			Bewertung
Versuchsteil 1: Faktor akustische Einschränkung			
Beurteilungsqualität	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Lenkungscharakteristik eines Fahrzeugs.	
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit negativ.	
	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Lenkungscharakteristik eines Fahrzeugs.	
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Beurteilungssicherheit negativ.	

Abbildung 4-36: Versuchsreihe Querdynamik, Versuchsteil 1 (akustische Einschränkung):
Bewertung der Hypothesen der subjektiven Daten

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Querdynamik			Bewertung
Versuchsteil 2: Faktor visuelle Einschränkung			
Beurteilungsqualität	H0	Die visuelle Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Lenkungscharakteristik eines Fahrzeugs.	
	H1	Die visuelle Einschränkung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit negativ.	
	H0	Die visuelle Einschränkung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Lenkungscharakteristik eines Fahrzeugs.	
	H1	Die visuelle Einschränkung beeinflusst die Beurteilungssicherheit negativ.	

Abbildung 4-37: Versuchsreihe Querdynamik, Versuchsteil 2 (visuelle Einschränkung):
Bewertung der Hypothesen der subjektiven Daten



Auf die zusätzliche Betrachtung der Beurteilungssicherheit in Abhängigkeit der Differenzierungsfähigkeit trifft dagegen exakt die Erklärung aus der Versuchsreihe der Längsdynamik zu. Eine anfänglich deutliche Spreizung in der Bewertung der Beurteilungssicherheit wird durch die jeweilige Einschränkung aufgehoben. Folglich kann wiederum angenommen werden, dass trotz gleichbleibendem Absolutwert eine negative Beeinflussung der Beurteilungsqualität vorliegt.

Einen Sonderfall bildet die Datenerhebung im Bereich der Vertikaldynamik. Sowohl in der Referenzfahrt als auch in den beiden Stufen mit akustischer Einschränkung sind die Probanden in rund der Hälfte der Fälle nicht in der Lage, eine richtige Differenzierung der Fahrwerksabstimmung vorzunehmen. Bei der dichotomen Entscheidung zwischen comfort- und dynamic-Modus entspricht dieses Ergebnis gerade einer Ratewahrscheinlichkeit.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Vertikaldynamik			
Faktor akustische Einschränkung			Bewertung
Beurteilungsqualität	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Fahrwerkscharakteristik eines Fahrzeugs.	
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit negativ.	
	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Fahrwerkscharakteristik eines Fahrzeugs.	
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Beurteilungssicherheit negativ.	

Abbildung 4-38: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten

Auch aufgrund der geringen Teststärke wird deshalb auf eine Interpretation der Hypothesen, vgl. Abbildung 4-38, verzichtet.

Für die Probanden spricht dagegen, dass generell höhere Bewertungen der Beurteilungssicherheit vergeben werden, die schlechte Differenzierungsfähigkeit also auch subjektiv wahrgenommen wird. Die in den anderen Versuchsreihen festgestellte Spreizung beim Vergleich der Bewertungen zwischen richtigen und falschen Antworten fällt geringer aus. Dies kann als weiterer Beleg für die Unsicherheit und Zufälligkeit der Entscheidungsfindung verstanden werden.

4.4.2 Objektive Daten des Fahrerverhaltens

Die objektiven Kennwerte der Versuchsreihe der Querdynamik ergeben bei akustischer Einschränkung ein widerspruchsfreies Bild. Auf Bahnführungsebene steigen die Fahrgeschwindigkeit, Querbewegung und Giergeschwindigkeit an, bereits die erste Stufe des verminderten Hörvermögens reicht dazu aus. Die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit wirkt sich im Weiteren auch auf die Stabilisierungsebene aus. Verknüpft mit den Folgen der Einschränkung erfolgt die

Lenkregeltätigkeit mit höherer Frequenz und höheren Amplituden. Dieser Trend ist bei allen Kennwerten durchgängig feststellbar, mit signifikanten Ergebnissen des Mittelwerts der Lenkradwinkelgeschwindigkeit wie auch des Maximums des Lenkradwinkels. Insgesamt betrachtet kann beim Ausbleiben akustischer Reize also von „unruhigerem“ Fahrerverhalten hinsichtlich der Kennwerte der Lenkregeltätigkeit bei gleichzeitig höheren Fahrgeschwindigkeiten ausgegangen werden. Dementsprechend werden bei den zugehörigen Hypothesen, vgl. Abbildung 4-39, die Nullhypothesen verworfen und die Alternativhypothesen als gültig angesehen. Vor dem Hintergrund der zumeist sehr hohen Teststärken besitzt dieses Ergebnis eine hohe Aussagekraft.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Querdynamik Versuchsteil 1: Faktor akustische Einschränkung			Bewertung
Fahrerverhalten	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Bahnführungsebene.	
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst das Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene.	
	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Stabilisierungsebene.	
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst das Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene.	

Abbildung 4-39: Versuchsreihe Querdynamik, Versuchsteil 1 (akustische Einschränkung):
Bewertung der Hypothesen der objektiven Daten

Die visuelle Einschränkung zeigt in Bezug auf die Fahrgeschwindigkeit ein entgegengesetztes Resultat. Insbesondere bei der zweiten Stufe der Sichteinschränkung erfolgt eine Reduzierung, verbunden auch mit einem signifikanten Rückgang der Querbeschleunigung und Giergeschwindigkeit.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Querdynamik Versuchsteil 2: Faktor visuelle Einschränkung			Bewertung
Fahrerverhalten	H0	Die visuelle Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Bahnführungsebene.	
	H1	Die visuelle Einschränkung beeinflusst das Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene.	
	H0	Die visuelle Einschränkung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Stabilisierungsebene.	
	H1	Die visuelle Einschränkung beeinflusst das Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene.	

Abbildung 4-40: Versuchsreihe Querdynamik, Versuchsteil 2 (visuelle Einschränkung):
Bewertung der Hypothesen der objektiven Daten



Prinzipiell wäre durch eine Einschränkung des horizontalen Sichtfeldes auf Stabilisierungsebene ein unruhigeres Fahrerverhalten mit einer Steigerung der Kennwerte zu erwarten gewesen, da der Zeitbedarf zum Erkennen des Kurvenverlaufs und des notwendigen Lenkeingriffs verkürzt wird. Durch die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit vergrößern die Probanden aber ihr Zeitbudget und erzielen einen gerade gegenläufigen Effekt. Bei den getesteten Hypothesen, vgl. Abbildung 4-40, werden die Alternativhypothesen akzeptiert, die Veränderungen im Fahrerverhalten annehmen. Bei der Effektrichtung ist aber die abnehmende Fahrgeschwindigkeit zu berücksichtigen.

Anhand der subjektiven Differenzierungsfähigkeit könnte geschlossen werden, dass bei der Versuchsreihe der Vertikaldynamik der technische Unterschied der Fahrwerksvarianten zu gering ausfällt, um einen wahrnehmbaren Effekt zu generieren. Die Fahrgeschwindigkeiten im dynamic-Modus liegen aber auf einem signifikant höheren Niveau als im comfort-Modus. So ist mittels der objektiven Daten nachweisbar, dass zumindest ein unbewusster Unterschied zwischen den Modi vorliegt, der sich auf das Fahrerverhalten auswirkt.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Vertikaldynamik			
Faktor akustische Einschränkung			
Fahrer- verhalten	H0	Die akustische Einschränkung hat keine Auswirkung auf die Wahl der Fahrgeschwindigkeit beim Befahren einer Schlechtwegestrecke.	
	H1	Die akustische Einschränkung beeinflusst die Wahl der Fahrgeschwindigkeit.	

Abbildung 4-41: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der obj. Daten

Der ebenfalls signifikante Faktor der akustischen Einschränkung weist eine Steigerung der Fahrgeschwindigkeit bei vermindertem Hörvermögen auch in dieser Versuchsreihe nach. Somit ist die Alternativhypothese, vgl. Abbildung 4-41, zutreffend. Dieses Ergebnis stimmt mit den bereits in Kapitel 2.2.3 erwähnten Aussagen von Bubb (1977) und Gratzner (2007) überein.

4.4.3 Diskussion des Versuchsdesigns

Speziell das im Bereich der Querdynamik am Beispiel der Fahrgeschwindigkeit wie auch der Längs- und Querschleunigung aufgezeigte, stark heterogene Fahrerverhalten bestätigt die Entscheidung für ein Within-Subjects-Design. Eine Versuchsvariante ohne Messwiederholung würde ansonsten die Gefahr mit sich bringen, dass die interindividuellen Unterschiede zwischen den Probanden in Kontroll- und Treatmentgruppe den eigentlichen Versuchseffekt überlagern. Verifiziert werden damit auch Ergebnisse und Aussagen wie beispielsweise bei Neukum, Krüger und Schuller (2001), die auf das heterogene Fahrerverhalten von Normalfahrern hinweisen.



Die Abschätzung der Probandenzahl der Versuchsreihen muss kritisch hinterfragt werden. Bei den objektiven Daten treffen die Annahmen weitgehend zu, dementsprechend ergeben sich hohe Teststärken. Die ermittelten Effekte der subjektiven Daten sind äußerst gering, somit wäre prinzipiell eine deutlich höhere Probandenzahl notwendig. Dem sind allerdings zwei Punkte entgegenzuhalten. Erstens steht die Aussagekraft nonparametrischer Testverfahren generell deutlich hinter parametrischen Tests zurück (Bühner & Ziegler, 2009). Somit sollte die Inferenzstatistik hier vielmehr als Anhaltspunkt dienen, eine Überinterpretation der auf diesem Weg erzielten Ergebnisse ist nicht zielführend. Zweitens ist festzustellen, dass der approximierte Effekt eine Größenordnung erreichen muss, die praktische Relevanz besitzt. Ist dies nicht der Fall, ist ein durch eine Erhöhung der Probandenzahl erreichtes, signifikantes Ergebnis ebenfalls wertlos.

Auch der alleinigen Betrachtung von Absolutwerten ist zu widersprechen. Die Zielsetzung bei der Bewertung einer Fahrzeugeigenschaft sollte nicht ausschließlich sein, einen Höchstwert in der Bewertungsleistung zu erreichen, wie es hier am Beispiel der Differenzierungsfähigkeit geprüft wird. Dieser ist sicherlich eine wichtige Grundlage, essentiell ist aber zusätzlich auch die Qualität der Bewertung in Form des Vertrauens des Bewertenden in die eigene Entscheidung. Dazu eignet sich durchaus auch eine rein deskriptive Betrachtung der Daten.

4.4.4 Folgerungen für die Gestaltung von Fahrsimulatoren

Bezüglich der Darstellung von Fahrzeuggeräuschen in Simulatoren kann mittels der Versuchsreihen der Quer- und Vertikaldynamik eine klare Aussage getroffen werden. Beide Probandenstudien lassen erkennen, dass das Ausbleiben bzw. bereits die leichte Reduktion der Geräuschkulisse zu verändertem Fahrerverhalten führt. Die Studie der Vertikaldynamik verdeutlicht dies für die reine Geschwindigkeitswahrnehmung, der Querdynamikversuch weist zusätzlich auch Auswirkungen auf das Lenkregelverhalten nach. Auf eine negative Beeinflussung der Beurteilungsqualität deutet die Versuchsreihe der Längs- wie auch der Querdynamik hin. Als Folgerung für den Bereich virtueller Techniken ist deshalb auf die Bedeutung einer präzisen, realitätsgetreuen Sounddarstellung, wie sie mittlerweile technologisch möglich ist, hinzuweisen. Den Aussagen in Kapitel 2.3.4.4 zum geringen Einfluss der Geräuschkulisse in Simulatoren, beispielsweise nach Jamson (2011), ist auf Basis dieser Versuche somit zu widersprechen.

In der durchgeführten Versuchsreihe mit eingeschränkter Sicht fällt insbesondere die angesprochene Abhängigkeit zwischen dem verfügbaren Sichtfeld und der Anpassung der Fahrgeschwindigkeit auf. Daraus kann gefolgert werden, dass bei Simulatorstudien mit unzureichender Visualisierung geschwindigkeitsinduzierte Quereffekte auftreten, welche die Kennwerte der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene verändern und somit die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Fahrerverhalten im Realfahrzeug verhindern. Dieser Befund stimmt überein mit den



in Kapitel 2.3.4.1 diskutierten Studien. Als Fazit kann deshalb festgestellt werden, dass größere Einschränkungen der realen Sichtverhältnisse eine unzulässige Vereinfachung darstellen. Auch hier ist zu empfehlen, sich am Stand der Technik zu orientieren und die in Kapitel 2.3.4 diskutierten technischen Möglichkeiten anzuwenden.



Kapitel 5

Probandenstudien im Fahrsimulator

Kapitel 5 beschreibt Versuchsreihen in der virtuellen Umgebung eines Fahrsimulators. Auch hier werden die drei Bereiche der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik analysiert. Die Versuche sind in ihrer Aussagekraft unabhängig, die Datenerhebung fand aus organisatorischen Gründen zeitgleich am selben Probandenkollektiv statt. Die Versuchsdurchführung im November 2013 wurde unterstützt durch die Studienarbeit von Mennig (2014). Zusätzlich finden sich darin weiterführende Datenerhebungen und Auswertungen zum Immersionsempfinden in virtuellen Umgebungen.

5.1 Zielsetzung und Versuchsdesign

Aufbauend auf den Ergebnissen der Realfahrzeugstudien wird in weiteren Probandenstudien der Zusammenhang von menschlicher Wahrnehmung und Fahrerverhalten bzw. Beurteilungs-



qualität im Fahrsimulator geprüft. Der Fokus der Versuchsreihen liegt auf der verbesserten Darstellung der vestibulären und somatosensorischen Reize mittels eines dynamischen Fahrsimulators. Verwendet wird dazu ein verhältnismäßig einfaches und damit kostengünstiges Bewegungssystem. Für dieses ist der Nachweis zu erbringen, dass in Bezug auf das Fahrerverhalten und die Beurteilungsqualität eine Steigerung der Erlebbarkeit fahrdynamischer Eigenschaften im Vergleich zu einem statischen Simulator erreicht werden kann. Ein weiteres Untersuchungsziel ist die Analyse der Reliabilität der Ergebnisse bei der Wiederholung von Versuchsumfängen. Mittels dieser Daten und der Bewertung der Abweichungen zu den Realfahrzeugstudien sollen Aussagen zur Validität des Simulators getroffen werden. Orientierung bieten hier Literaturvergleiche zu Validierungsstudien beispielsweise bei Mullen et al. (2011) oder Zöller (2015).

5.1.1 Versuchsreihe Längsdynamik

Die **Beurteilungsaufgabe** in der Versuchsreihe Längsdynamik besteht im Wiedererkennen zweier unterschiedlicher Motorcharakteristiken, die es während der **Fahraufgabe** eines Beschleunigungsvorgangs zu erfassen gilt. Diese Aufgaben werden mehrfach in einer statischen und einer dynamischen Variante eines Fahrsimulators durchgeführt.

Die Probandenstudie zur Längsdynamik zielt, wie bereits bei der vorangegangenen Studie im Realfahrzeug, überwiegend auf die Analyse der Beurteilungsqualität ab. Bei der statischen Simulatorkonfiguration stehen dazu nur die akustischen Reize des Motorengeräuschs und visuelle Informationen zur Verfügung. Der dynamische Simulator bietet durch eine Nickbewegung der Bewegungsplattform zusätzliche vestibuläre und somatosensorische Reize.

5.1.1.1 Versuchsfaktoren

Drei jeweils zweistufige Faktoren werden in dieser Versuchsreihe variiert, womit sich insgesamt acht Kombinationen ergeben.

Tabelle 5-1: Versuchsfaktoren der Versuchsreihe Längsdynamik

Faktor	Simulatorkonfiguration	Fahrtwiederholung	Motorcharakteristik
Stufen	statisch	Fahrt 1	comfort
	dynamisch	Fahrt 2	dynamic

Der Faktor der Simulatorkonfiguration mit den Stufen statisch und dynamisch dient dabei der Prüfung der gesteigerten Erlebbarkeit durch den zusätzlichen Einsatz einer Bewegungsplattform. Die doppelte Ausführung aller Versuchsfahrten, als Faktor Fahrtwiederholung bezeichnet, ermöglicht die Analyse der Reliabilität. Der dritte Faktor, die Motorcharakteristik, wird wie bereits in den Realfahrzeugversuchen nur zur Darstellung der Differenzierungsaufgabe genutzt.



5.1.1.2 Hypothesen und zugehörige Kennwerte

Die Hypothesen der Versuchsreihe Längsdynamik beschränken sich mangels individueller Lösungsmöglichkeit der Fahraufgabe auf die Prüfung der Beurteilungsqualität bei der Beurteilungsaufgabe. Zum Faktor der Simulatorkonfiguration werden gerichtete Hypothesen aufgestellt, da die zusätzlichen Reize der Bewegungsplattform ein Verbesserungspotential darstellen.

Hypothesen und Kennwerte der Versuchsreihe Längsdynamik Faktor Simulatorkonfiguration			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Motorcharakteristik.	Differenzierungsfähigkeit
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform erhöht die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Motorcharakteristik.	Beurteilungssicherheit
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform erhöht die Beurteilungssicherheit.	

Abbildung 5-1: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Längsdynamik – Faktor Simulatorkonfiguration

Der Faktor der Fahrtwiederholung kann sich positiv wie negativ auf die Differenzierungsfähigkeit und Beurteilungssicherheit auswirken. Dementsprechend sind ungerichtete Formulierungen gewählt.

Hypothesen und Kennwerte der Versuchsreihe Längsdynamik Faktor Fahrtwiederholung			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Motorcharakteristik im Fahrsimulator.	Differenzierungsfähigkeit
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Motorcharakteristik im Fahrsimulator.	Beurteilungssicherheit
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Beurteilungssicherheit.	

Abbildung 5-2: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Längsdynamik – Faktor Fahrtwiederholung

Der Faktor der Motorcharakteristik dient auch hier ausschließlich der Darstellung der Differenzierungsaufgabe und entfällt deshalb bei der Betrachtung der Beurteilungsqualität.



5.1.2 Versuchsreihe Querdynamik

Die Versuchsreihe der Querdynamik sieht als **Fahraufgabe** die Fahrt auf einem simulierten Handlingkurs analog der Realfahrzeugstudie vor. Die **Beurteilungsaufgabe** besteht in der Differenzierung zweier Lenkungscharakteristiken. Die zentrale Fragestellung der Versuchsreihe ist, ob der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators Vorteile hinsichtlich des Fahrerhaltens oder der Beurteilungsqualität im Vergleich zu einer statischen Simulatorkonfiguration mit sich bringt.

Die Unterscheidung der Lenkungscharakteristiken geschieht vorwiegend durch die propriozeptive Wahrnehmung. Die Bewegungsplattform bietet die Möglichkeit, die Rückmeldung in Form des Bewegungsverhaltens des Fahrzeugs auch vestibulär erkennen zu können. Zusätzlich werden auch in dieser Versuchsreihe die Ergebnisse auf Reliabilität geprüft, indem die Fahrten wiederholt ausgeführt werden.

5.1.2.1 Versuchsfaktoren

Die drei Versuchsfaktoren sind jeweils zweistufig, woraus acht Kombinationsmöglichkeiten bei den Versuchsfahrten resultieren. Zum Test des Einflusses der vestibulären Informationen besteht der Faktor Simulatorkonfiguration aus den Stufen mit aktivierter und deaktivierter Bewegungsplattform, während die Prüfung der Reliabilität den Faktor der Fahrtwiederholung erfordert. Durch die Gestaltung der Beurteilungsaufgabe entsteht der dritte Faktor der Lenkungscharakteristik, der bei der inferenzstatistischen Auswertung beachtet werden muss, weiter aber nicht analysiert wird.

Tabelle 5-2: Versuchsfaktoren der Versuchsreihe Querdynamik

Faktor	Simulatorkonfiguration	Fahrtwiederholung	Lenkungscharakteristik
Stufen	statisch	Fahrt 1	comfort
	dynamisch	Fahrt 2	dynamic

5.1.2.2 Hypothesen und zugehörige Kennwerte

Bei der Ausführung der Beurteilungsaufgabe wird ein positiver Einfluss auf die Beurteilungsqualität erwartet, wenn die Bewegungsplattform des Simulators aktiv ist. Ebenso wird geprüft, ob und in welchem Ausmaß das Fahrerverhalten verändert wird, vgl. Abbildung 5-3. Dazu werden die bereits in Kapitel 3.4.2 vorgestellten Kennwerte der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene betrachtet. Die Datenerhebung der objektiven Kennwerte zum Fahrerverhalten und subjektiven Kennwerte zur Beurteilungsqualität wird gleichermaßen genutzt, um Aussagen zur Reliabilität der Simulatorversuche zu treffen. Die zugehörigen Hypothesen zum Faktor der Fahrtwiederholung sind in Abbildung 5-4 dargestellt.



Hypothesen und Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik Faktor Simulatorkonfiguration			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Lenkungscharakteristik.	Differenzierungs- fähigkeit
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform erhöht die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Lenkungscharakteristik.	Beurteilungs- sicherheit
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform erhöht die Beurteilungssicherheit.	
Fahrerverhalten	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Bahnführungsebene.	5 Kennwerte der Bahnführungs- ebene
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform verändert das Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene.	
	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Stabilisierungsebene.	5 Kennwerte der Stabilisierungs- ebene
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform verändert das Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene.	

Abbildung 5-3: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik – Faktor Simulatorkonfiguration

Hypothesen und Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik Faktor Fahrtwiederholung			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Lenkungscharakteristik im Fahrsimulator.	Differenzierungs- fähigkeit
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Lenkungscharakteristik im Fahrsimulator.	Beurteilungs- sicherheit
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Beurteilungssicherheit.	
Fahrerverhalten	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Bahnführungsebene.	5 Kennwerte der Bahnführungs- ebene
	H1	Die Fahrtwiederholung verändert das Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene.	
	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Stabilisierungsebene.	5 Kennwerte der Stabilisierungs- ebene
	H1	Die Fahrtwiederholung verändert das Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene.	

Abbildung 5-4: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik – Faktor Fahrtwiederholung

5.1.3 Versuchsreihe Vertikaldynamik

Die Versuchsreihe Vertikaldynamik erfordert als **Fahraufgabe** die Fahrt auf einer simulierten Schlechtwegestrecke. Die **Beurteilungsaufgabe** besteht in der Differenzierung zweier unterschiedlicher Fahrwerkscharakteristiken.

Diese Differenz ist fast ausschließlich vestibulär und somatosensorisch wahrnehmbar. Deshalb wird getestet, inwieweit die Vertikalanregungen der Bewegungsplattform von Vorteil sind. Wie bereits bei den Versuchsreihen zuvor findet zusätzlich eine Wiederholung der Versuchsfahrten statt.

5.1.3.1 Versuchsfaktoren

Der Faktor der Simulatorkonfiguration besteht anstelle einer dynamischen und statischen Simulatorkonfiguration aus zwei Varianten mit vollständigem und reduziertem Bewegungsumfang der Plattform. Eine rein statische Variante des Simulators würde keine Vermittlung von Vertikalanregungen ermöglichen und somit eine Differenzierung von Fahrwerkscharakteristiken verhindern. Der zweistufige Faktor der Fahrtwiederholung wird wie zuvor zur Prüfung der Reliabilität genutzt, die Versuchsfahrten werden also doppelt ausgeführt. Die Darstellung der Differenzierungsaufgabe erzeugt wiederum den Faktor der Fahrwerkscharakteristik, von einer weiterführenden Analyse wird auch hier abgesehen.

Tabelle 5-3: Versuchsfaktoren der Versuchsreihe Vertikaldynamik

Faktor	Simulatorkonfiguration	Fahrtwiederholung	Fahrwerkscharakteristik
Stufen	dynamisch – reduzierter Bewegungsumfang	Fahrt 1	comfort
	dynamisch – vollständiger Bewegungsumfang	Fahrt 2	dynamic

5.1.3.2 Hypothesen und zugehörige Kennwerte

Die Hypothesen zur Beurteilungsqualität beschreiben ein Verbesserungspotential durch die Erhöhung des Bewegungsumfangs der Simulatorplattform in Bezug auf die Differenzierungsfähigkeit und auch Beurteilungssicherheit. Gleichzeitig wird geprüft, ob durch die intensiveren Vertikalanregungen ein Einfluss auf die Wahl der Fahrgeschwindigkeit besteht, vgl. Abbildung 5-5.



Hypothesen und Kennwerte der Versuchsreihe Vertikaldynamik Faktor Simulatorkonfiguration			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Fahrwerkscharakteristik.	Differenzierungsfähigkeit
	H1	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform erhöht die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Fahrwerkscharakteristik.	Beurteilungssicherheit
	H1	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform erhöht die Beurteilungssicherheit.	
Fahrerverhalten	H0	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform hat keine Auswirkung auf die Wahl der Fahrgeschwindigkeit beim Befahren einer Schlechtwegestrecke.	Fahrgeschwindigkeit
	H1	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform beeinflusst die Wahl der Fahrgeschwindigkeit.	

Abbildung 5-5: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Vertikaldynamik – Faktor Simulatorkonfiguration

Anhand der drei erhobenen Kennwerte, der Differenzierungsfähigkeit, der Beurteilungssicherheit und der objektiven Größe der Fahrgeschwindigkeit wird weiterhin auch die Reliabilität bzw. der Faktor der Fahrtwiederholung geprüft. Die Hypothesen dazu, vgl. Abbildung 5-6, sind analog der vorherigen Versuchsreihen formuliert.

Hypothesen und Kennwerte der Versuchsreihe Vertikaldynamik Faktor Fahrtwiederholung			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Fahrwerkscharakteristik im Fahrsimulator.	Differenzierungsfähigkeit
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Fahrwerkscharakteristik im Fahrsimulator.	Beurteilungssicherheit
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Beurteilungssicherheit.	
Fahrerverhalten	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf die Wahl der Fahrgeschwindigkeit beim Befahren einer Schlechtwegestrecke.	Fahrgeschwindigkeit
	H1	Die Fahrtwiederholung verändert die Wahl der Fahrgeschwindigkeit.	

Abbildung 5-6: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Vertikaldynamik – Faktor Fahrtwiederholung



5.1.4 Datenerhebung und statistische Bewertung der Versuchsfaktoren

Abschließend erfolgen einige Ergänzungen zum Umgang mit den Versuchsfaktoren und Kennwerten bei der inferenzstatistischen Betrachtung. Das Vorgehen orientiert sich dabei an den Realfahrzeugstudien in Kapitel 4.

5.1.4.1 Objektive Daten des Fahrerverhaltens

Als Verfahren der Inferenzstatistik ergibt sich aus dem Versuchsdesign eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung der jeweils zweistufigen Faktoren. Der Faktor der Lenkungs- bzw. Fahrwerkscharakteristik muss bei der Varianzanalyse mitgeführt werden, wird aber, wie bereits bei den Versuchsreihen im Realfahrzeug, nicht näher betrachtet. Zielsetzung sind übergreifende Aussagen zum Einfluss des Faktors der Simulatorkonfiguration und des Faktors der Fahrtwiederholung. Auf einzelne paarweise Tests zwischen diesen Faktoren wird deshalb, sofern keine Quereffekte beobachtet werden, verzichtet.

5.1.4.2 Subjektive Daten der Beurteilungsqualität

Als Faktoren bzw. unabhängige Variablen werden die Simulatorkonfiguration sowie die Fahrtwiederholung betrachtet. Wie in den Versuchsreihen der Realfahrzeugstudie entfällt ein Versuchsfaktor, da die Stufen comfort und dynamic der Motor-, Lenkungs- oder Fahrwerkscharakteristik als Entscheidungskriterium dienen und deshalb zusammengefasst werden.

Um Abweichungen zwischen den vier verbleibenden Gruppen festzustellen, wird im Fall der Differenzierungsfähigkeit der Cochran-Q-Test genutzt, bei der Beurteilungssicherheit wird auf den Friedman-Test zurückgegriffen. Wie bereits in Kapitel 3.4.3 beschrieben, kann mittels Post-Hoc-Tests analysiert werden, zwischen welchen Vergleichspaaren die Unterschiede bestehen.

5.2 Realisierung des Versuchsdesigns

Im Weiteren werden der Aufbau des Fahrsimulators, die Versuchsdurchführung sowie die praktische Umsetzung der Fahr- und Beurteilungsaufgaben dargestellt. Abschließend erfolgt die Beschreibung des Probandenkollektivs.

5.2.1 Aufbau des Fahrsimulators

Der für die Versuchsreihen eingesetzte, dynamische Fahrsimulator verfügt über ein Bewegungssystem mit drei räumlichen Freiheitsgraden. Möglich sind rotatorische Nick- und Wank- sowie translatorische Vertikalbewegungen. Auf dieser Bewegungsplattform wird ein Audi A3 Sportback als Mockup verwendet. Zur Reduktion der bewegten Massen ist der Antriebsstrang entfernt, ansonsten wird das Fahrzeug weitgehend unverändert genutzt. Drei Monitore vor dem Fahrzeug stellen die Außensicht dar, die im Innenspiegel und in den Außenspiegeln verbauten Displays zeigen die rückwärtige Sicht. Die Simulation der Geräusche von Fahrzeug und Umgebung erfolgt über ein Mehrkanalsystem mittels der fahrzeugeigenen Lautsprecher.

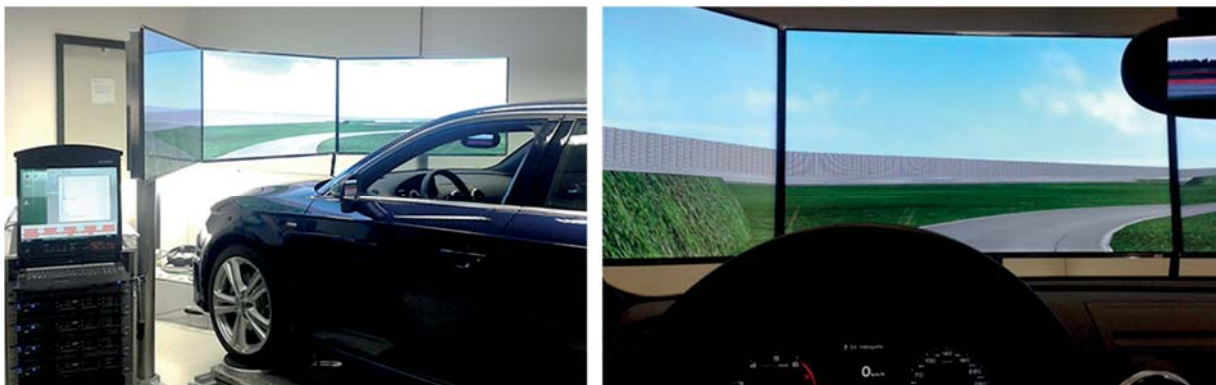


Abbildung 5-7: Außenansicht und Fahrersicht des eingesetzten Fahrsimulators

Softwareseitig wird ein echtzeitfähiges Mehrkörper-Simulations-Modell auf Basis von veDYNA (Tesis Dynaware) zur Berechnung der Fahrdynamik eingesetzt. Um Konsistenz mit den Versuchsreihen im Realfahrzeug herzustellen und die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, erfolgt die Bedatung mit den Parametern eines Audi A7. Die Umfeldsimulation wird mit der Software VirtualTestDrive (Vires) erzeugt, welche die Möglichkeit der Einbindung hochauflöser Streckenmodelle bietet.

5.2.2 Versuchsablauf

Die Versuchsreihen werden im Within-Subjects-Design durchlaufen, wobei die Fahrtreihenfolge innerhalb jeder Versuchsreihe permutiert wird. Zu Beginn erfolgt ein Simulatortraining in Form eines gezielten Testens der einzelnen Fahraufgaben. Während dieser Gewöhnungs- und



Übungsphase werden zu jeder Versuchsreihe auch die zu unterscheidenden Fahrzeugcharakteristiken vorgestellt. Deren Differenzierung erfolgt während des Versuchs folglich als Wiedererkennungsaufgabe. Die Auswahl des comfort- oder dynamic-Modus des Motors, der Lenkung oder des Fahrwerks wird am Kontrollstand des Fahrsimulators vorgenommen und ist daher für den Fahrer nicht sichtbar. Die Daten zur Differenzierungsfähigkeit und Beurteilungssicherheit werden unmittelbar nach jeder Fahrt erhoben.

5.2.3 Gestaltung der Fahr- und Beurteilungsaufgaben

Die Umsetzung der in Kapitel 5.1 definierten Fahr- und Beurteilungsaufgaben wird im Folgenden im Detail beschrieben. Bei der Darstellung dieser Aufgaben wird auf hohe Vergleichbarkeit zu den Realfahrzeugstudien geachtet.

5.2.3.1 Versuchsreihe Längsdynamik

Ein gerader, ebener Fahrstreifen wird für die Vollastbeschleunigung aus dem Stand auf 100 km/h genutzt. Nach einer kurzen Konstantfahrt erfolgt eine im Rahmen der Arbeit nicht weiter betrachtete Bremsung. Anschließend bietet die Versuchsstrecke ausreichend Platz, um den Beschleunigungsvorgang zu wiederholen. Die Kick-down- (Übergas-) Funktionalität des Automatikgetriebes wird nicht verwendet. Im Fahrdynamikmodell des Simulators sind zwei verschiedene Varianten eines 3.0 TDI Aggregats mit 160 kW bzw. 230 kW hinterlegt. Diese führen zu einer Spreizung im Beschleunigungsvermögen, die beim Erreichen von 100 km/h dem zeitlichen Unterschied des comfort- und dynamic-Modus der Realfahrzeugstudie entspricht. Das Soundmodell des Simulators stellt drehzahl- und geschwindigkeitsabhängig die Differenz dar, ein visuelles Erkennen von Schaltstufe oder Drehzahl im Kombiinstrument wird durch eine Abdeckung verhindert.

5.2.3.2 Versuchsreihe Querdynamik

Die simulierte Strecke besteht aus einer hochpräzisen Nachbildung des Handlingkurses der Realfahrzeugstudie. Mittels eines Laserscans erzeugte Streckendaten mit einer Genauigkeit von 1 mm im Höhenprofil bei einem 5 mm-Raster bilden die Berechnungsgrundlage für die Fahrbahnanregungen im Fahrdynamikmodell. Durch die Überlagerung und Modellierung mit Hilfe von Fotografien entsteht auch optisch für den Fahrer ein identisches Bild der Strecke. Für die Datenerhebung relevant sind die bereits in der Realfahrzeugstudie gewählten sieben Kurven in Streckenmitte. Die Aufgabenstellung wird ebenfalls identisch zur Versuchsreihe im Realfahrzeug gewählt und besteht im zügigen sowie sicheren Befahren der Strecke.

Da im Mockup des Simulators die vollständige, elektromechanische Servolenkung erhalten ist, können beliebige Lenkradmomentenverläufe dargestellt werden. Dies wird genutzt, um die Stu-



fen comfort und dynamic abzubilden. Zusätzlich simuliert das Fahrdynamikmodell eine geschwindigkeitsabhängige Überlagerungslenkung. In der Stufe dynamic wird so ein direkteres Lenkverhalten simuliert, welches der Fahrer durch den geringeren Lenkradwinkelbedarf wahrnehmen kann. Für das Befahren desselben Kurvenradius mit identischer Geschwindigkeit ist in der Stufe comfort ein größerer Lenkradwinkel notwendig. Das Übersetzungsverhältnis von Lenkradwinkel zu Lenkwinkel ist hier also indirekter.

5.2.3.3 Versuchsreihe Vertikaldynamik

Die Vermessungsdaten des Prüfgeländes Neustadt bilden auch in der Versuchsreihe zur Vertikaldynamik die Grundlage für die Fahrbahngestaltung. Auf einem geraden Fahrstreifen werden drei unterschiedliche Schlechtwegestrecken simuliert. In den ersten beiden Abschnitten ist die Fahrgeschwindigkeit auf 25 bzw. 35 km/h begrenzt, da die Bewegungsplattform des Simulators hinsichtlich der darstellbaren Anregungsfrequenzen beschränkt ist. Sie dienen deshalb ausschließlich dem Fahrer zur Differenzierung der Fahrwerksabstimmung. Das dritte Teilstück enthält den Fahrbahnbelag analog der Realfahrzeugstudie mit geringeren Schadstellen, hier kann die Geschwindigkeit bis zu einem Maximum von 80 km/h frei gewählt werden. Die Aufgabenstellung erfordert von den Probanden die Einstellung einer subjektiv als komfortabel eingeschätzten Geschwindigkeit. Die beiden Abstufungen der Fahrwerkscharakteristik werden als unterschiedliche Kennlinien im Fahrdynamikmodell hinterlegt und verändern so das Ansprechverhalten der Bewegungsplattform.

5.2.4 Stichprobenbeschreibung

Insgesamt wurden Daten von 36 Mitarbeitern der AUDI AG im Rahmen der Studienarbeit von Mennig (2014) erhoben. Die Teilnahme erfolgte unentgeltlich während der regulären Arbeitszeit. Für die hier analysierten Versuchsreihen wurden 28 Probanden, die durch ihre Tätigkeit und ihr fahrzeugspezifisches Wissen dem in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Nutzerprofil entsprechen, ausgewählt. Die weiteren Teilnehmer wurden aufgrund von Unverträglichkeit des Simulators oder mangelndem fachlichen Hintergrund von der Betrachtung ausgeschlossen.

Tabelle 5-4: Probandenkollektiv der Versuchsreihen im Fahrsimulator (n=28)

Alter	
Mittelwert (Standardabw.)	33,8 Jahre (8,6 Jahre)
Anteil Männer	100 %
Fahrerfahrung	
Mittelwert (Standardabw.)	15,9 Jahre (8,8 Jahre)

Im Vorfeld wurde die Größe des Probandenkollektivs für die Fragestellungen dieser Arbeit abgeschätzt. Basis der Berechnung sind die folgenden Annahmen:

- Der Fehler 1. Art soll mit einer Wahrscheinlichkeit geringer .05 eintreten, die Teststärke mindestens .80 betragen.
- Bereits bei den Realfahrzeugstudien bestätigte sich die Vermutung sehr hoher Korrelationen bei der eingeübten Tätigkeit der Fahrzeugführung. Hier wird der Wert ebenfalls mit $\bar{r} \geq .6$ angenommen.
- Als relevant werden wiederum mittelgroße Effekte mit $\eta_p^2 \geq .06$ angesehen.

Mittels der Software G*Power (Universität Düsseldorf) wird eine Probandenzahl von 28 Personen errechnet. Dies entspricht der letztlich verbleibenden Anzahl an Versuchspersonen, somit ist die Datenbasis ausreichend.



5.3 Ergebnisse

Getrennt nach den Versuchsreihen der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik erfolgt die grafische und inferenzstatistische Darstellung der Ergebnisse. Eine tabellarische Übersicht zu den objektiven Versuchsergebnissen kann dem Anhang A.2 entnommen werden.

5.3.1 Ergebnisse Längsdynamik

In Bezug auf die Fahrtreihenfolge ergeben sich bei der jeweils ersten Fahrt höhere Werte der **Differenzierungsfähigkeit**. Beim Vergleich der beiden Simulatorvarianten lässt sich eine höhere Erkennungsleistung im Fall des statischen Simulators feststellen. Die Auswertung mittels des Cochrans-Q-Tests kann aber keinen signifikanten Unterschied zwischen den Fahrten bestätigen, $\chi^2(3) = 2.79$; $p = .43$; $\omega = .22$. Die Teststärke ist allerdings gering, $1-\beta = .37$.

Tabelle 5-5: Differenzierungsfähigkeit hinsichtlich der Motorcharakteristik, $n = 56$

	Anzahl richtig [-]	Anzahl falsch [-]	Differenzierungsfähigkeit [%]
Simulator statisch Fahrt 1	46	10	82,1
Simulator statisch Fahrt 2	41	15	73,2
Simulator dynamisch Fahrt 1	42	14	75,0
Simulator dynamisch Fahrt 2	39	17	69,6

Obwohl die ermittelte Differenzierungsfähigkeit bei den ersten Fahrten etwas über dem Niveau der zweiten Fahrten liegt, vgl. Tabelle 5-5, ist die Entscheidung zu Beginn mit einer größeren Unsicherheit verbunden, vgl. Abbildung 5-8 zur **Beurteilungssicherheit**. Dies ist am Median wie auch dem Interquartilsabstand zu erkennen. Beim Vergleich der statischen und dynamischen Variante kann von einem identischen Ergebnis gesprochen werden. Bestätigt wird dies durch den Test nach Friedman, $\chi^2(3) = 6.88$; $p = .08$; $\omega = .35$; $1-\beta = .58$, der keine Unterschiede zwischen den Fahrten als signifikant ausweist. Zwischen Fahrten mit richtigen und falschen Entscheidungen tritt eine Spreizung in der Beurteilungssicherheit auf. Dies kann bei allen vier Kategorien in Abbildung 5-8 gleichermaßen nachvollzogen werden.

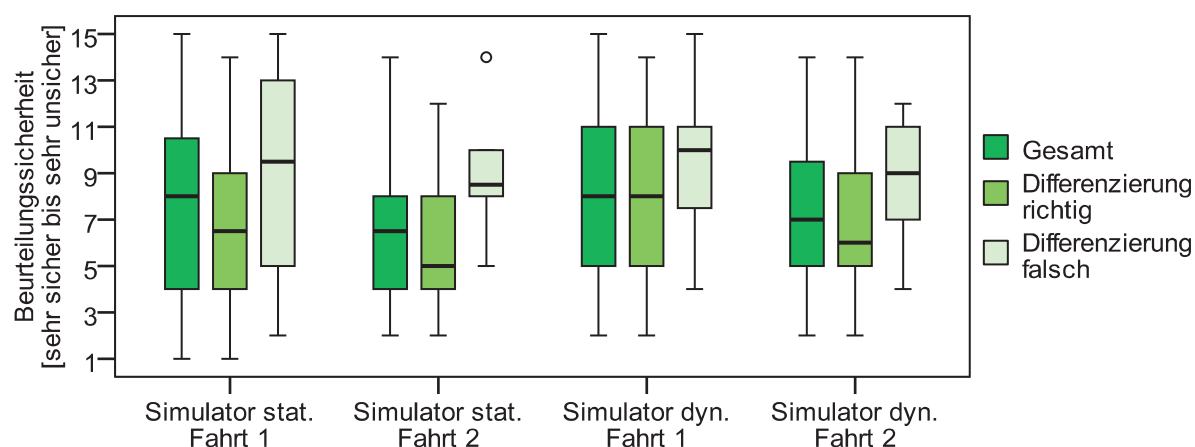


Abbildung 5-8: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Motorcharakteristik (Gesamt: n = 56), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung

5.3.2 Ergebnisse Querdynamik

Die Ergebnisse werden getrennt nach subjektiven und objektiven Daten dargestellt. Bei letzteren wird zusätzlich nach Bahnführungs- bzw. Stabilisierungsebene unterschieden.

5.3.2.1 Subjektive Daten der Versuchsreihe Querdynamik

Der dynamische Fahrsimulator führt zu einer leicht besseren **Differenzierungsfähigkeit** als dies ohne die Bewegungsplattform der Fall ist.

Tabelle 5-6: Differenzierungsfähigkeit hinsichtlich der Lenkungscharakteristik, n = 56

	Anzahl richtig [-]	Anzahl falsch [-]	Differenzierungsfähigkeit [%]
Simulator statisch Fahrt 1	41	15	73,2
Simulator statisch Fahrt 2	44	12	78,6
Simulator dynamisch Fahrt 1	46	10	82,1
Simulator dynamisch Fahrt 2	45	11	80,4

In Bezug auf die Fahrtreihenfolge ist kein klarer Trend ersichtlich. Insgesamt ergeben sich nur geringe Unterschiede, die statistische Analyse lässt die Gruppen gleichwertig erscheinen, $\chi^2(3) = 1.75$; $p = .63$; $\omega = .18$; $1-\beta = .27$.



Die Betrachtung der gesamten **Beurteilungssicherheit** zeigt weder hinsichtlich des Faktors der Simulatorkonfiguration noch des Faktors der Fahrtwiederholung größere Abweichungen. Einzig die Bewertung der ersten Fahrt im statischen Simulator wird mit größerer Unsicherheit vorgenommen, diese korreliert mit der niedrigsten Differenzierungsfähigkeit. Der Friedman-Test erkennt keine signifikanten Effekte, $\chi^2(3) = 4.37$; $p = .22$; $\omega = .28$; $1-\beta = .39$. Die Spreizung der Bewertung zwischen richtigen und falschen Entscheidungen ist deutlich ausgeprägt, lässt aber ebenfalls keine Deutung von Gruppenunterschieden zu.

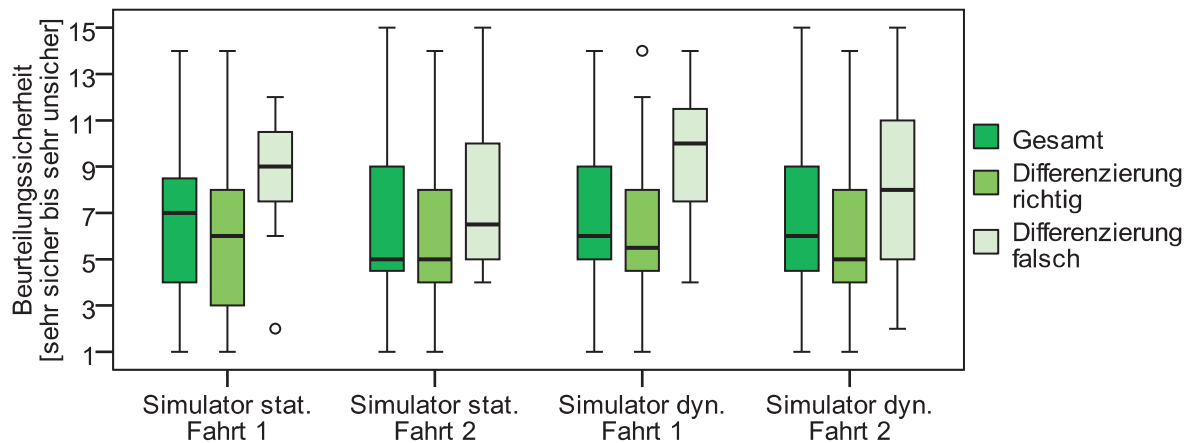


Abbildung 5-9: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Lenkungscharakteristik (Gesamt: $n = 56$), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung

5.3.2.2 Objektive Daten der Versuchsreihe Querdynamik

5.3.2.2.1 Kennwerte der Bahnführungsebene

Die **durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit** beträgt über alle Gruppen sehr ausgeglichen rund 57 km/h. Minimale, nicht signifikante Steigerungen treten lediglich bei Fahrtwiederholung auf, $F(1; 27) = 2.18$; $p = .15$; $\eta_p^2 = .08$; $1-\beta = 1.0$. Der Faktor der Lenkungscharakteristik mit den Stufen comfort und dynamic, $F(1; 27) = .29$; $p = .60$; $\eta_p^2 = .01$; $1-\beta = .41$, wie auch der Faktor der Simulatorkonfiguration mit den Varianten statisch und dynamisch, $F(1; 27) = .17$; $p = .68$; $\eta_p^2 = .01$; $1-\beta = .20$, beeinflussen die Fahrgeschwindigkeit nicht.

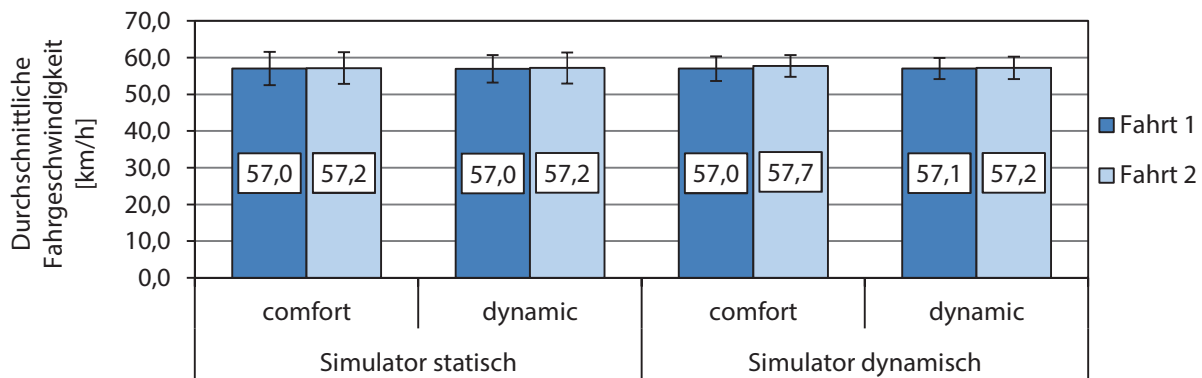


Abbildung 5-10: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, n = 28

Die Bremsengriffe erreichen bei fast allen Fahrten den im Simulationsmodell hinterlegten physikalischen Grenzwert des Fahrzeugs, wie am **Minimum der Längsbeschleunigung** nachvollzogen werden kann. Beim Faktor der Fahrtwiederholung tritt dieser Effekt durchgängig und ohne größere Unterschiede auf, $F(1; 27) = .42$; $p = .52$; $\eta_p^2 = .02$; $1-\beta = .41$. Abweichungen durch den Einsatz der Bewegungsplattform des Simulators sind ebenfalls nicht erkennbar, $F(1; 27) = 2.56$; $p = .12$; $\eta_p^2 = .09$; $1-\beta = .99$. Weiterhin ist bei diesem längsdynamischen Kennwert keine Abhängigkeit zum Faktor der Lenkungscharakteristik zu erwarten. Die Varianzanalyse bestätigt diese Annahme, $F(1; 27) = 2.62$; $p = .12$; $\eta_p^2 = .09$; $1-\beta = .99$.

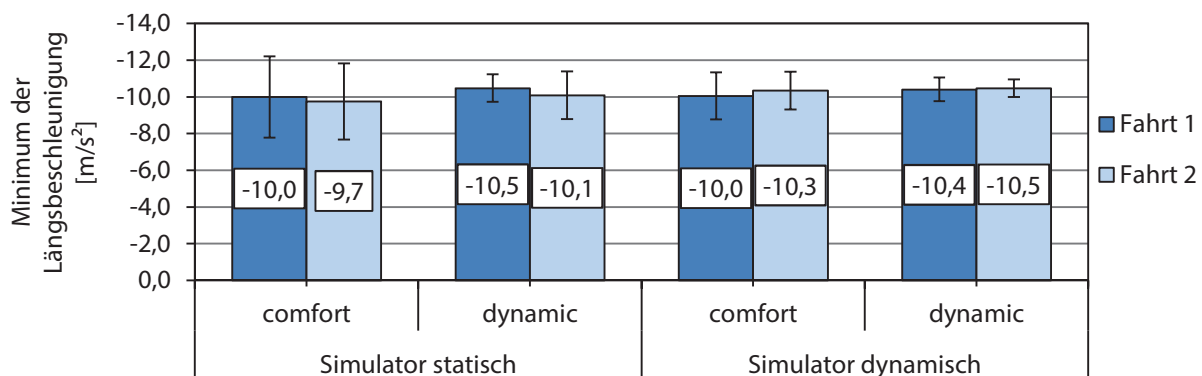


Abbildung 5-11: Minimum der Längsbeschleunigung, n = 28

Da bei Fahrtwiederholung geringfügig schneller gefahren wird, ist dieser Trend auch bei der **durchschnittlichen Querbewegungsbeschleunigung** ersichtlich. Allerdings kann auch hier von keinem signifikanten Ergebnis gesprochen werden, $F(1; 27) = 3.40$; $p = .08$; $\eta_p^2 = .11$; $1-\beta = 1.0$. Die beiden Stufen der Lenkungscharakteristik weichen dagegen signifikant voneinander ab, $F(1; 27) = 4.79$; $p = .04$; $\eta_p^2 = .15$; $1-\beta = 1.0$.

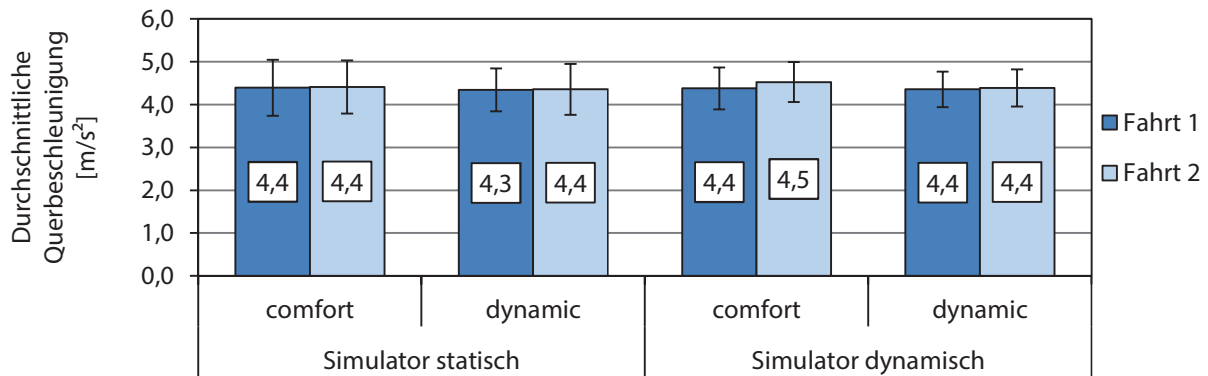


Abbildung 5-12: Durchschnittliche Querbeschleunigung, n = 28

Der Faktor der Simulatorkonfiguration wiederum bleibt ohne Auswirkung auf die durchschnittliche Querbeschleunigung, $F(1; 27) = .50$; $p = .49$; $\eta_p^2 = .02$; $1-\beta = .55$.

Die Betrachtung der **maximalen Querbeschleunigung** führt zu einem identischen Resultat. Der Einfluss der Lenkungscharakteristik wirkt sich hochsignifikant auf das Ergebnis aus, $F(1; 27) = 29.58$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .52$; $1-\beta = 1.0$. Signifikante Effekte hinsichtlich der Faktoren der Fahrtwiederholung, $F(1; 27) = .41$; $p = .53$; $\eta_p^2 = .02$; $1-\beta = .38$, oder der Simulatorkonfiguration, $F(1; 27) = 1.82$; $p = .19$; $\eta_p^2 = .06$; $1-\beta = .97$, bleiben aus.

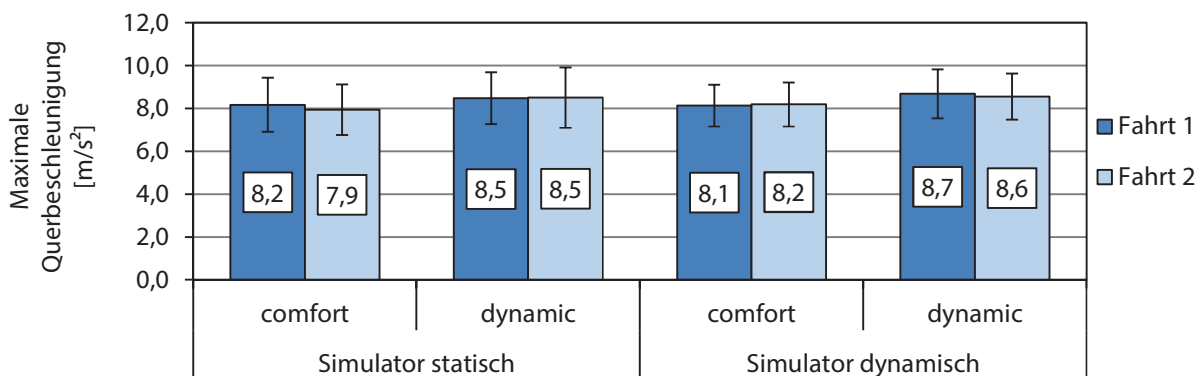


Abbildung 5-13: Maximale Querbeschleunigung, n = 28

Die **Giergeschwindigkeit** steigt bei Fahrtwiederholung zumeist leicht an, ebenso im Vergleich zwischen statischem und dynamischem Simulator. Beim Einsatz der dynamic-Stufe der Lenkung ergeben sich geringfügig kleinere Werte. Der Faktor der Fahrtwiederholung, $F(1; 27) = 4.51$; $p = .04$; $\eta_p^2 = .14$; $1-\beta = 1.0$, und der Faktor der Lenkungscharakteristik, $F(1; 27) = 10.13$; $p = .004$; $\eta_p^2 = .27$; $1-\beta = 1.0$, besitzen jeweils signifikanten Einfluss auf die Werte. Nicht signifikant ist die Veränderung des Kennwerts durch den Faktor der Simulatorkonfiguration, $F(1; 27) = 1.87$; $p = .18$; $\eta_p^2 = .07$; $1-\beta = .98$.

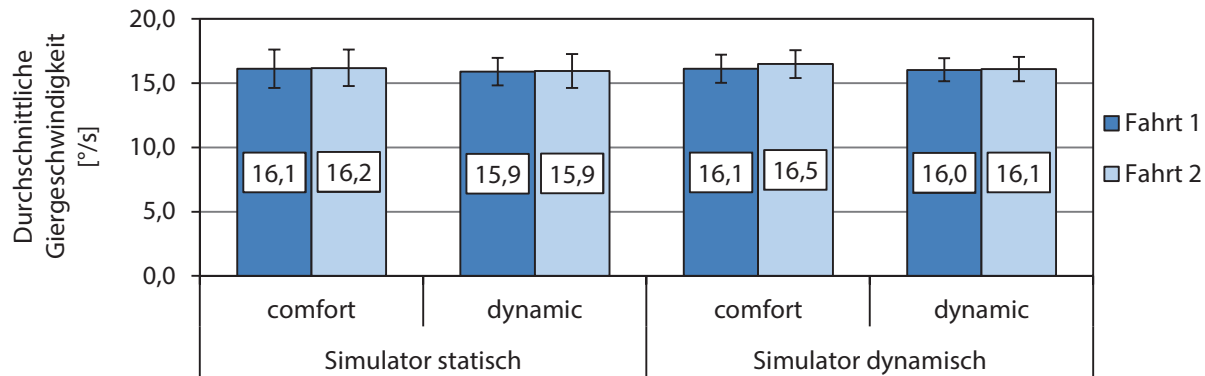


Abbildung 5-14: Durchschnittliche Giergeschwindigkeit, n = 28

5.3.2.2.2 Kennwerte der Stabilisierungsebene

Ein klar zu erkennender Anstieg der **Lenkradwinkelgeschwindigkeit** ist im Fall des dynamischen Simulators feststellbar. Dieser Effekt des Faktors Simulatorkonfiguration ist hochsignifikant, $F(1; 27) = 13.07$; $p = .001$; $\eta_p^2 = .33$; $1-\beta = 1.0$. Weiterhin fällt auf, dass die Werte im dynamic-Modus der Lenkung im Vergleich mit dem comfort-Modus etwas erniedrigt sind. Die Differenz der beiden Stufen des Faktors Lenkungscharakteristik zeigt sich jedoch nicht als signifikant, $F(1; 27) = 3.88$; $p = .06$; $\eta_p^2 = .13$; $1-\beta = 1.0$. Für die Unterschiede zwischen den jeweils ersten und zweiten Fahrten ergibt sich keine einheitliche Tendenz, bestätigt durch das Ergebnis der Varianzanalyse für den Faktor Fahrtwiederholung, $F(1; 27) = .55$; $p = .47$; $\eta_p^2 = .02$; $1-\beta = .69$.

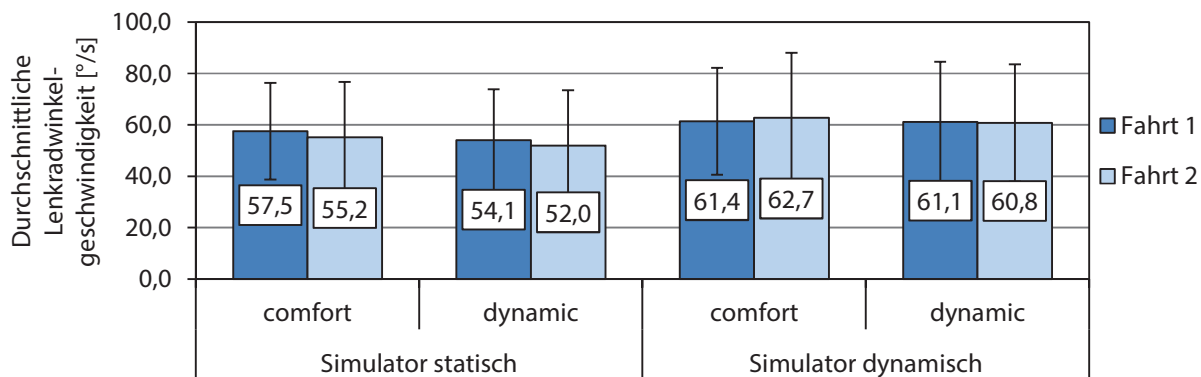


Abbildung 5-15: Durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit, n = 28

Erhöhte Werte der **Standardabweichung des Lenkradwinkels** werden gemessen, wenn die Bewegungsplattform des Simulators aktiv ist. Die Varianzanalyse für den Faktor Simulatorkonfiguration bestätigt, dass der große Effekt eine signifikante Auswirkung auf das Ergebnis besitzt, $F(1; 27) = 4.22$; $p = .05$; $\eta_p^2 = .14$; $1-\beta = 1.0$. Die noch deutlicheren Abweichungen zwischen den beiden Stufen des Faktors Lenkungscharakteristik ergeben ein hochsignifikantes Resultat, $F(1; 27) = 272.03$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .91$; $1-\beta = 1.0$.



Von Einflüssen der Fahrtwiederholung auf die Werte ist nicht auszugehen. Allerdings muss auf eine geringe Teststärke hingewiesen werden, $F(1; 27) = .54$; $p = .47$; $\eta_p^2 = .02$; $1-\beta = .40$.

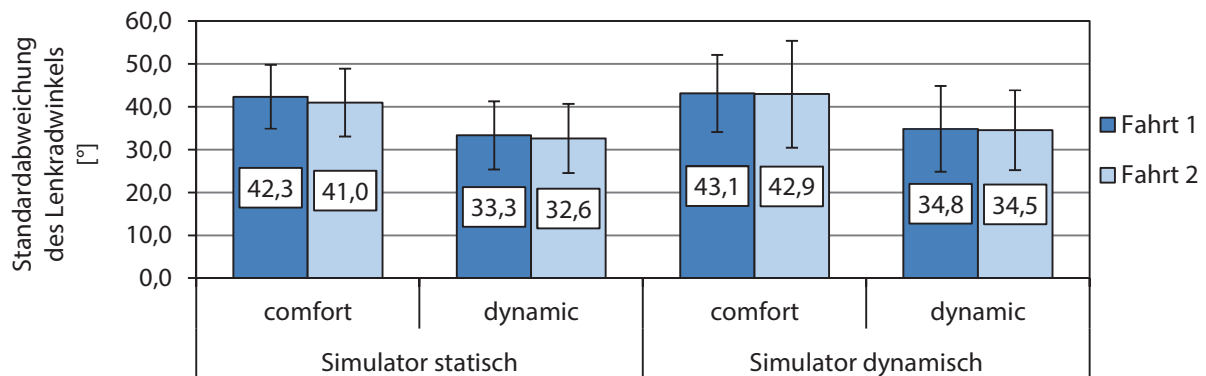


Abbildung 5-16: Standardabweichung des Lenkradwinkels, $n = 28$

Die technischen Unterschiede zwischen der comfort- und dynamic-Stufe der Lenkung lassen sich auch am **maximalen Lenkradwinkel** sehr gut veranschaulichen. Die Differenz von knapp 40° in einigen Stufen ergibt einen hochsignifikanten Effekt für den Faktor Lenkungscharakteristik, $F(1; 27) = 192.86$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .88$; $1-\beta = 1.0$. Ein Anstieg des Kennwerts bei Einsatz der Bewegungsplattform kann nur teilweise erkannt werden, insgesamt weist die Varianzanalyse für den Faktor Simulatorkonfiguration keinen signifikanten Effekt aus, $F(1; 27) = 2.93$; $p = .10$; $\eta_p^2 = .10$; $1-\beta = .99$. Ebenso uneinheitlich treten Abweichungen zwischen der jeweils ersten und zweiten Fahrt auf, insgesamt betrachtet hat der Faktor Fahrtwiederholung keine Auswirkung, $F(1; 27) = 1.40$; $p = .25$; $\eta_p^2 = .05$; $1-\beta = .76$.

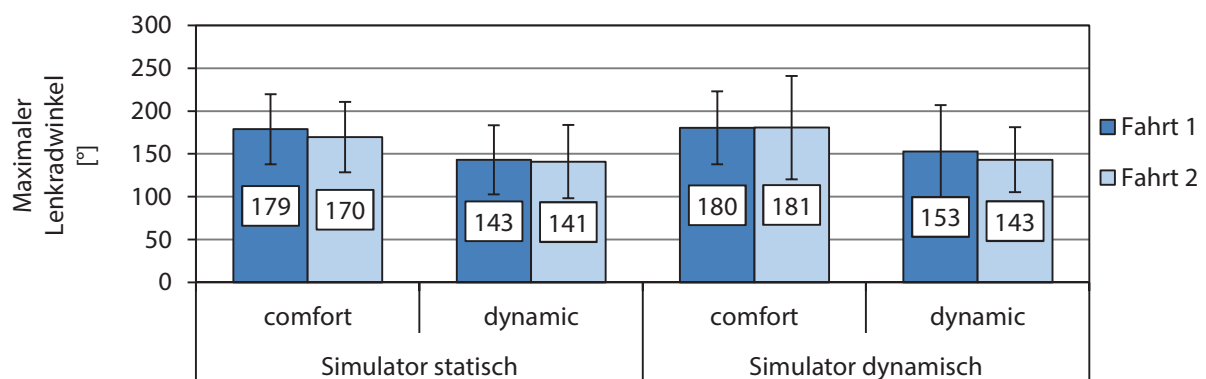


Abbildung 5-17: Maximaler Lenkradwinkel, $n = 28$

Das **Lenkfrequenzverhältnis** wird von zwei Faktoren signifikant beeinflusst. Der Einsatz der Bewegungsplattform erzeugt höhere Kennwerte als im Fall des statischen Simulators, $F(1; 27) = 7.93$; $p = .01$; $\eta_p^2 = .23$; $1-\beta = 1.0$. Weiterhin ist der Einfluss der Lenkung rein grafisch bereits deutlich erkennbar, entsprechend führt der Faktor Lenkungscharakteristik zu einem



hochsignifikanten Ergebnis, $F(1; 27) = 105.82$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .80$; $1-\beta = 1.0$. Die Fahrtwiederholung bleibt ohne Auswirkung, $F(1; 27) = .04$; $p = .84$, allerdings ergibt der äußerst geringe Effekt $\eta_p^2 = .001$ eine nicht aussagekräftige Teststärke $1-\beta = .08$. Generell schränken hohe und stark heterogene Streuungen, gekoppelt mit einer Verletzung der Normalverteilungsannahme, die Bewertung des Kennwerts ein.

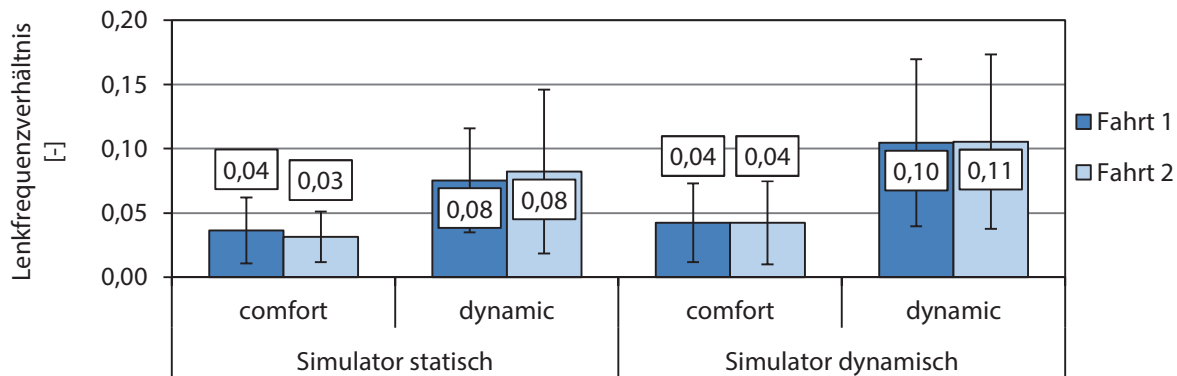


Abbildung 5-18: Lenkfrequenzverhältnis, $n = 28$

In der Darstellung der **Lenkrückstellrate** finden sich ebenfalls verhältnismäßig hohe Standardabweichungen. Die Verteilungsbreite zwischen den Gruppen kann aber als homogen beschrieben werden. Klare Mittelwertunterschiede ergeben sich beim Faktor der Lenkungscharakteristik, $F(1; 27) = 71.68$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .73$; $1-\beta = 1.0$. Auch der Faktor der Simulatorkonfiguration wirkt sich signifikant auf das Ergebnis aus, $F(1; 27) = 10.70$; $p = .003$; $\eta_p^2 = .28$; $1-\beta = 1.0$. Effekte durch die Fahrtwiederholung zeigen sich in einer kaum feststellbaren Größenordnung und dementsprechend ohne Signifikanz, $F(1; 27) = .01$; $p = .93$; $\eta_p^2 = .0001$. Wie zuvor resultiert eine sehr geringe Teststärke $1-\beta = .05$.

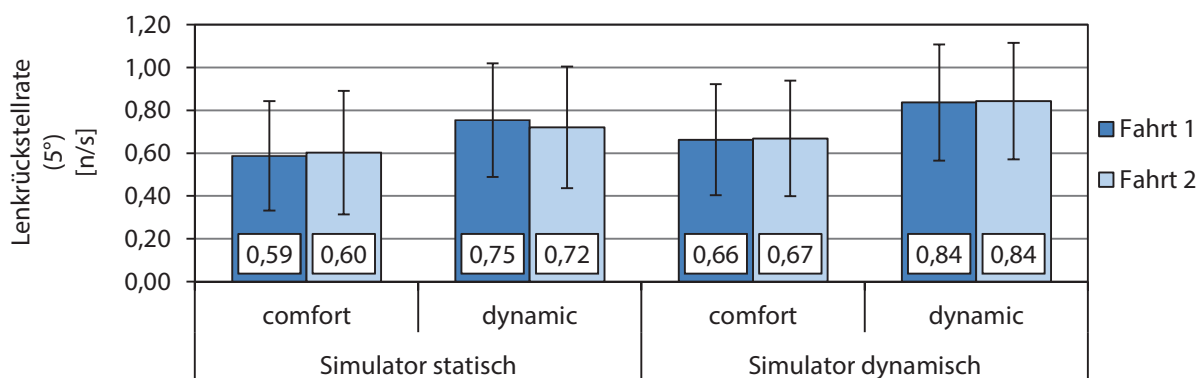


Abbildung 5-19: Lenkrückstellrate (5°), $n = 28$



5.3.3 Ergebnisse Vertikaldynamik

Abschließend werden die Ergebnisse der Versuchsreihe Vertikaldynamik beschrieben.

5.3.3.1 Subjektive Daten der Versuchsreihe Vertikaldynamik

Die Werte der **Differenzierungsfähigkeit** liegen deutlich niedriger als in den Versuchsreihen zuvor und nur marginal höher als die fünfzigprozentige Ratewahrscheinlichkeit zu dieser dichotomen Variablen. Bei den jeweils ersten Fahrten ist eine geringfügig erhöhte Erkennungsquote feststellbar.

Das Testergebnis belegt, dass keine signifikanten Unterschiede auftreten, $\chi^2(3) = .29$; $p = .96$. Die Effekt- und Teststärken sind hierzu allerdings sehr gering, $\omega = .07$; $1-\beta = .13$.

Tabelle 5-7: Differenzierungsfähigkeit hinsichtlich der Fahrwerkscharakteristik, $n = 56$

	Anzahl richtig [-]	Anzahl falsch [-]	Differenzierungsfähigkeit [%]
Simulator statisch Fahrt 1	31	25	55,4
Simulator statisch Fahrt 2	29	27	51,8
Simulator dynamisch Fahrt 1	31	25	55,4
Simulator dynamisch Fahrt 2	29	27	51,8

Die fehlende Fähigkeit, die Fahrwerksvarianten zu differenzieren, spiegelt sich auch in der **Beurteilungssicherheit** mit besonders hohen Bewertungen wider, vgl. Abbildung 5-20. Beim Vergleich hinsichtlich der Fahrtwiederholung finden sich unwesentlich niedrigere Bewertungen der jeweils ersten Fahrt, in Bezug auf die statische oder dynamische Simulatorkonfiguration ergeben sich keine Unterschiede.

Dies deckt sich mit den Ergebnissen des Friedman-Tests, $\chi^2(3) = 1.22$; $p = .75$; $\omega = .15$; $1-\beta = .13$, der keine signifikanten Gruppenunterschiede ausweist. Insbesondere fällt auf, dass zwischen den Bewertungen der richtigen und falschen Entscheidungen die bisher beschriebene Spreizung ausbleibt. Lediglich in der ersten Fahrt der statischen Simulatorvariante ist sie deutlich erkennbar, der gegenläufige Trend bei Fahrtwiederholung steht allerdings einer Verallgemeinerung entgegen.

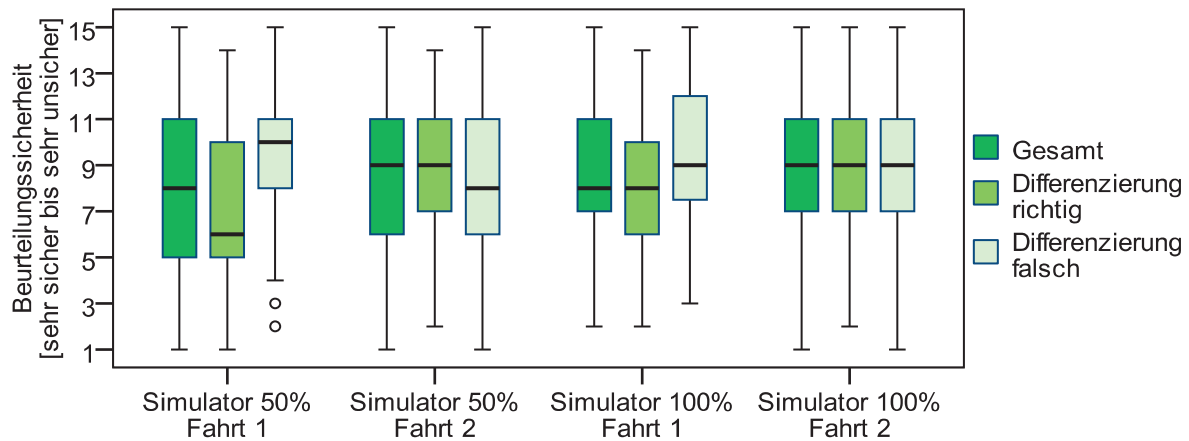


Abbildung 5-20: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Fahrwerkscharakteristik (Gesamt: $n = 56$), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung

5.3.3.2 Objektive Daten der Versuchsreihe Vertikaldynamik

Die selbst gewählten, **durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeiten** auf unebener Fahrbahn betragen rund 64 bis 67 km/h. Der Faktor Fahrwerkscharakteristik führt zu einer leichten, nicht signifikanten Erhöhung der Werte im dynamic-Modus, $F(1; 27) = 2.26$; $p = .15$; $\eta_p^2 = .08$; $1-\beta = 1.0$. Auch der Faktor der Simulatorkonfiguration, mit den beiden Stufen 50 % und 100 % Bewegungsumfang der Simulatorplattform, ergibt keine statistisch signifikanten Unterschiede, $F(1; 27) = 1.45$; $p = .24$; $\eta_p^2 = .05$; $1-\beta = .84$. Dagegen wird bei Fahrtwiederholung bereits rein anschaulich in allen Gruppen eine Steigerung der Werte ersichtlich. Diese lässt sich auch mittels der Varianzanalyse belegen, $F(1; 27) = 12.76$; $p = .001$; $\eta_p^2 = .32$; $1-\beta = 1.0$.

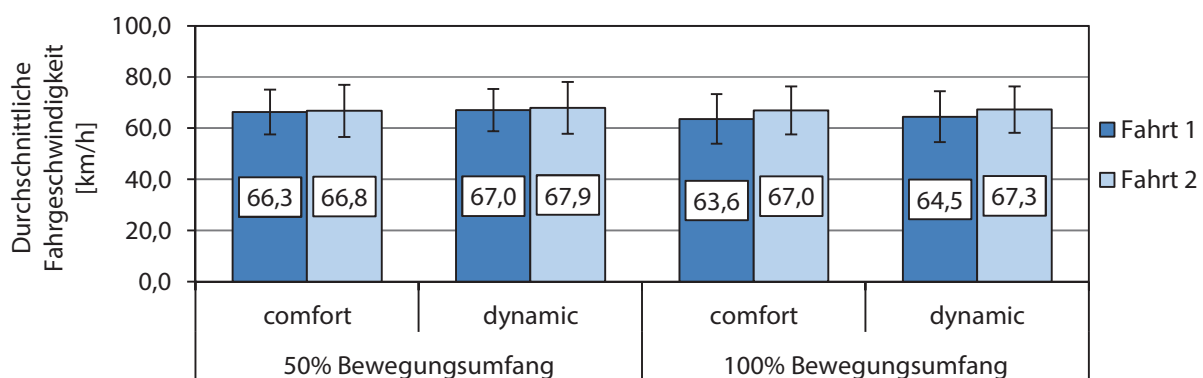


Abbildung 5-21: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, $n = 28$



Zur Verdeutlichung und Quantifizierung der technischen Unterschiede der comfort- und dynamic-Stufe der Fahrwerkscharakteristik sind zusätzlich die Werte der durchschnittlich auftretenden Vertikalbeschleunigung wie auch der maximal ermittelten Vertikalbeschleunigung angegeben.

Bei der **durchschnittlichen Vertikalbeschleunigung** wird eine hochsignifikante Abweichung zwischen dem comfort- und dynamic-Modus festgestellt, $F(1; 27) = 459.25$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .94$; $1-\beta = 1.0$.

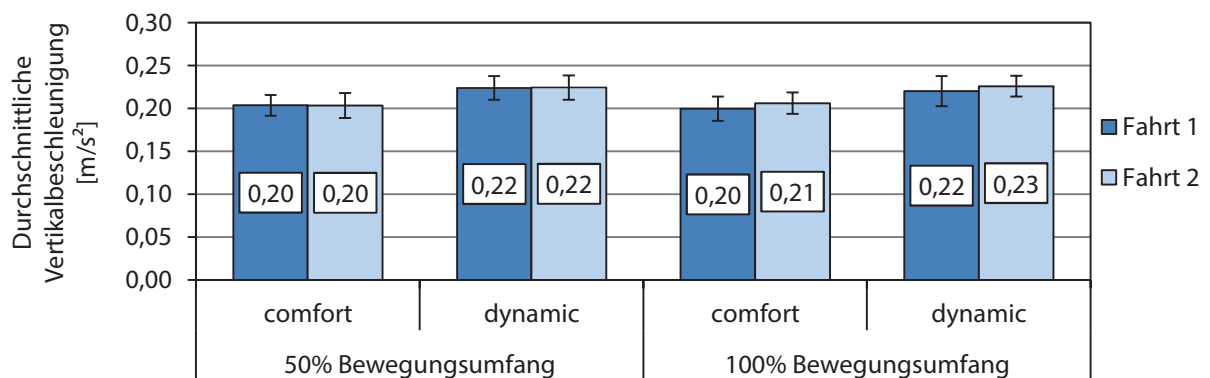


Abbildung 5-22: Durchschnittliche Vertikalbeschleunigung, $n = 28$

Die **maximalen Vertikalbeschleunigungen** können auf einzelne Erschütterungen durch Schadstellen im Fahrbahnbelag zurückgeführt werden. Auch hier führt der technische Unterschied zu einer hochsignifikanten Differenz von 0,3 bis 0,4 m/s^2 zwischen comfort- und dynamic-Stufe der Fahrwerkscharakteristik, $F(1; 27) = 228.98$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .90$; $1-\beta = 1.0$.

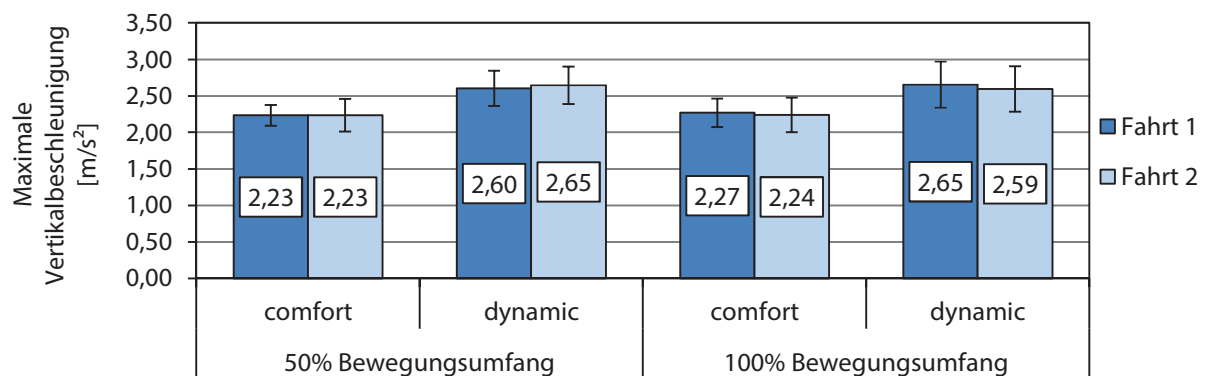


Abbildung 5-23: Maximale Vertikalbeschleunigung, $n = 28$

5.4 Diskussion

In der abschließenden Diskussion wird zur besseren Vergleichbarkeit der Versuchsreihen zunächst nach subjektiven und objektiven Ergebnissen getrennt, anschließend folgt ein Abgleich mit den Werten der vorangegangenen Studien im Realfahrzeug. Ergänzend findet sich zum Abschluss des Kapitels eine Methodenkritik.

5.4.1 Subjektive Daten der Beurteilungsqualität

Die Versuchsreihe der Längsdynamik erzielt in Bezug auf die Differenzierungsfähigkeit keine signifikanten Ergebnisse für den Faktor der Fahrtwiederholung und der Simulatorkonfiguration. Die Nullhypothesen, vgl. Abbildung 5-24 (oben) und Abbildung 5-25 (oben), wären demnach zutreffend. Die geringe Teststärke verhindert aber eine aussagekräftige Interpretation.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Längsdynamik			Bewertung
Faktor Simulatorkonfiguration			
Beurteilungsqualität	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Motorcharakteristik.	
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform erhöht die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Motorcharakteristik.	
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform erhöht die Beurteilungssicherheit.	

Abbildung 5-24: Versuchsreihe Längsdynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Simulatorkonfiguration

Auch hinsichtlich der Beurteilungssicherheit treten weder zwischen den beiden Simulatorkonfigurationen noch der ersten und zweiten Fahrt signifikante Abweichungen auf. Zu diesen Hypothesen, vgl. Abbildung 5-24 (unten) und Abbildung 5-25 (unten), werden deshalb die Nullhypothesen akzeptiert. Es wird aber auf eine Teststärke von lediglich 58 % verwiesen.

Die Betrachtung der Bewertungen der Beurteilungssicherheit, getrennt nach richtiger und falscher Differenzierung, lässt die bereits aus dem Realfahrzeug bekannte Spreizung der Antworten erkennen. Diese ist jedoch in allen Fahrten gleichermaßen vorhanden, somit kann auch hier kein Einfluss des Faktors der Fahrtwiederholung oder der Simulatorkonfiguration abgeleitet werden. Positiv herauszustellen ist dennoch, dass unabhängig von der Simulatorvariante dieses Qualitätsmerkmal der Entscheidung nicht nur im Realfahrzeug, sondern auch in der virtuellen Umgebung des Fahrsimulators vorhanden ist.



Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Längsdynamik			Bewertung
Faktor Fahrtwiederholung			
Beurteilungsqualität	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Motorcharakteristik im Fahrsimulator.	
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Motorcharakteristik im Fahrsimulator.	
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Beurteilungssicherheit.	

Abbildung 5-25: Versuchsreihe Längsdynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Fahrtwiederholung

Die Probandenstudie zur Querdynamik liefert sowohl hinsichtlich der Differenzierungsfähigkeit als auch der Beurteilungssicherheit keine signifikanten Ergebnisse. Auf eine Interpretation aller vier aufgestellten Hypothesen, vgl. Abbildung 5-26 und Abbildung 5-27, wird angesichts der geringen Teststärken vollständig verzichtet.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Querdynamik			Bewertung
Faktor Simulatorkonfiguration			
Beurteilungsqualität	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Lenkungscharakteristik.	
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform erhöht die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Lenkungscharakteristik.	
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform erhöht die Beurteilungssicherheit.	

Abbildung 5-26: Versuchsreihe Querdynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Simulatorkonfiguration

Anzumerken ist, dass die ermittelten Effekte, speziell für die Beurteilungssicherheit, durchaus eine Größenordnung mit praktischer Relevanz besitzen. Eine Steigerung der Probandenzahl zur Bewertung der Hypothesen ist in diesem Fall als sinnvoll anzusehen.

Die Abhängigkeit der Beurteilungssicherheit von der Differenzierungsfähigkeit kann in dieser Versuchsreihe ebenfalls festgestellt werden. Wie zuvor verändert die Fahrtwiederholung oder der Einsatz der Bewegungsplattform diese Differenz zwischen richtigen und falschen Antworten nicht.



Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Querdynamik Faktor Fahrtwiederholung			Bewertung
Beurteilungsqualität	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Lenkungscharakteristik im Fahrsimulator.	
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Lenkungscharakteristik im Fahrsimulator.	
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Beurteilungssicherheit.	

Abbildung 5-27: Versuchsreihe Querdynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Fahrtwiederholung

Bereits in der Versuchsreihe Vertikaldynamik im Realfahrzeug erwies sich die Differenzierung der beiden Fahrwerkscharakteristiken als schwierig. Die in der Simulatorstudie zusätzlich erhobenen Daten zu den durchschnittlichen und maximalen Vertikalbeschleunigungen belegen, dass technisch gesehen eine deutliche und signifikante Abweichung zwischen den Stufen comfort und dynamic vorhanden ist. Verglichen mit den von Heißing et al. (2000) beschriebenen Grenzwerten der menschlichen Wahrnehmung, vgl. Kapitel 2.2.2.3, sollte diese Differenz eine relevante und erfassbare Größenordnung besitzen. Dennoch verbleiben auch im Simulator die ermittelten Werte der Differenzierungsfähigkeit im Bereich einer Ratewahrscheinlichkeit von knapp über 50 %. Als mögliche Ursache können verringerte Aufmerksamkeitsressourcen durch die zusätzliche Ausübung der Fahraufgabe angenommen werden. Im Vergleich zu Studien unter klinischen Bedingungen ergeben sich deshalb höhere Wahrnehmungsschwellen, die im Rahmen dieser Versuchsreihe offensichtlich nicht erreicht wurden.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Vertikaldynamik Faktor Simulatorkonfiguration			Bewertung
Beurteilungsqualität	H0	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Fahrwerkscharakteristik.	
	H1	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform erhöht die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Fahrwerkscharakteristik.	
	H1	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform erhöht die Beurteilungssicherheit.	

Abbildung 5-28: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Simulatorkonfiguration



In Folge kann eine erhöhte Unsicherheit in der Beurteilung anhand zweier Punkte erkannt werden. Erstens ergeben sich höhere Absolutwerte der Beurteilungssicherheit, zweitens bleibt die in den Versuchsreihen Längs- und Querdynamik festgestellte Spreizung zwischen richtigen und falschen Bewertungen mit Ausnahme eines Teilergebnisses aus.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Vertikaldynamik Faktor Fahrtwiederholung			Bewertung
Beurteilungsqualität	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf das Differenzieren der Fahrwerkscharakteristik im Fahrsimulator.	
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Fahrwerkscharakteristik im Fahrsimulator.	
	H1	Die Fahrtwiederholung beeinflusst die Beurteilungssicherheit.	

Abbildung 5-29: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Fahrtwiederholung

Da Zufälligkeiten in Form willkürlicher Entscheidungen nicht ausgeschlossen werden können, werden die Hypothesen zu den Kennwerten der Differenzierungsfähigkeit und Beurteilungssicherheit des Faktors Simulatorkonfiguration, vgl. Abbildung 5-28, und des Faktors Fahrtwiederholung, vgl. Abbildung 5-29, mit ohnehin nur geringen Effektgrößen nicht interpretiert.

5.4.2 Objektive Daten des Fahrerverhaltens

In der Versuchsreihe Querdynamik ergeben sich für die Kennwerte der Bahnführungsebene keine signifikanten Abweichungen zwischen der statischen und dynamischen Simulatorkonfiguration. Die geringen Mittelwertdifferenzen der Fahrgeschwindigkeit und der Querbeschleunigung bilden kleine Effekte, welche in mäßigen Teststärken resultieren. Bei den anderen Kennwerten treten durchgängig sehr hohe Teststärken auf, insgesamt betrachtet kann daher eine Aussage zu den Hypothesen, vgl. Abbildung 5-30, getroffen werden. Auf Bahnführungsebene wird die Nullhypothese akzeptiert, die besagt, dass die Bewegungsplattform keinen Einfluss auf das Fahrerverhalten besitzt. Auf Stabilisierungsebene wird eine Steigerung aller Kennwerte bei Einsatz des dynamischen anstelle des statischen Simulators ersichtlich. Mit Ausnahme des Maximums des Lenkradwinkels ist diese Beobachtung statistisch signifikant bei durchgängig hohen Teststärken. Daher wird die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen.

Einzig die durchschnittliche Giergeschwindigkeit zeigt eine signifikante Abhängigkeit in Bezug auf die Fahrtwiederholung, bei der zweiten Fahrt steigen die Werte an. Eine ähnliche, allerdings

nicht signifikante Tendenz ergibt sich noch für die durchschnittliche Querbesehleunigung. Alle anderen Kennwerte können als zeitlich unabhängig betrachtet werden, da kein verändertes Fahrerverhalten vorliegt. Folglich werden die Nullhypothesen zum Faktor der Fahrtwiederholung, vgl. Abbildung 5-31, mit der Ausnahme der Giergeschwindigkeit beibehalten. Die Gültigkeit dieser Entscheidung wird durch die teilweise mäßige Teststärke eingeschränkt.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Querdynamik			Bewertung
Faktor Simulatorkonfiguration			
Fahrerverhalten	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Bahnführungsebene.	✓
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform verändert das Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene.	
	H0	Der Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Stabilisierungsebene.	✗
	H1	Der Einsatz der Bewegungsplattform verändert das Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene.	

Abbildung 5-30: Versuchsreihe Querdynamik: Bewertung der Hypothesen der obj. Daten, Faktor Simulatorkonfiguration

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Querdynamik			Bewertung
Faktor Fahrtwiederholung			
Fahrerverhalten	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Bahnführungsebene.	✓
	H1	Die Fahrtwiederholung verändert das Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene.	
	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Stabilisierungsebene.	✓
	H1	Die Fahrtwiederholung verändert das Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene.	

Abbildung 5-31: Versuchsreihe Querdynamik: Bewertung der Hypothesen der obj. Daten, Faktor Fahrtwiederholung

Der Umfang der Plattformbewegung in der Versuchsreihe der Vertikaldynamik hat keine Auswirkung auf die Wahl der Fahrgeschwindigkeit beim Befahren einer Schlechtwegestrecke. Daraus kann geschlossen werden, dass die Intensität der simulierten Erschütterungen im hier eingesetzten Umfang keinen direkten Einfluss auf die Geschwindigkeitswahrnehmung besitzt. Damit wird angenommen, dass die Geschwindigkeitswahrnehmung in dieser Versuchsreihe überwiegend durch visuelle Reize beeinflusst wird. Dagegen kann hinsichtlich des Faktors der



Fahrtwiederholung davon ausgegangen werden, dass Trainingseffekte vorliegen und die Adaption an die Simulationsumgebung nach der ersten Fahrt noch nicht vollständig abgeschlossen ist.

Bei gleichzeitig hohen Teststärken wird deshalb die Nullhypothese des Faktors der Simulator-konfiguration, vgl. Abbildung 5-32, beibehalten, dagegen beim Faktor der Fahrtwiederholung, vgl. Abbildung 5-33, die Alternativhypothese als gültig angesehen.

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Vertikaldynamik Faktor Simulatorkonfiguration			Bewertung
Fahrer- verhalten	H0	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform hat keine Auswirkung auf die Wahl der Fahrgeschwindigkeit beim Befahren einer Schlechtwegestrecke.	
	H1	Die Intensität der Bewegungen der Simulatorplattform beeinflusst die Wahl der Fahrgeschwindigkeit.	

Abbildung 5-32: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der obj. Daten, Faktor Simulatorkonfiguration

Bewertung der Hypothesen der Versuchsreihe Vertikaldynamik Faktor Fahrtwiederholung			Bewertung
Fahrer- verhalten	H0	Die Fahrtwiederholung hat keine Auswirkung auf die Wahl der Fahrgeschwindigkeit beim Befahren einer Schlechtwegestrecke.	
	H1	Die Fahrtwiederholung verändert die Wahl der Fahrgeschwindigkeit.	

Abbildung 5-33: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der obj. Daten, Faktor Fahrtwiederholung

5.4.3 Ergebnisbewertung und Vergleich mit Realfahrzeugstudien

Auf Bahnführungsebene werden bei den Referenzfahrten im Realfahrzeug leicht höhere Fahrgeschwindigkeiten als im Simulator wie auch höhere Werte der Querschleunigung oder Giergeschwindigkeit erzielt. Insgesamt betrachtet sind die Abweichungen aber sehr gering. Probleme der Validität können neben den Absolutwerten aber auch hinsichtlich der Variabilität der Ergebnisse auftreten, wie dies von Mullen et al. (2011) berichtet wird. Obwohl die unterschiedliche Stichprobengröße mit 24 Teilnehmern im Realfahrzeugversuch und 28 Personen im Simulatorversuch die direkte Vergleichbarkeit einschränkt, kann bei ähnlichem Mittelwert eine Abschätzung getroffen werden. Leicht höhere Standardabweichungen der Kennwerte finden sich zu meist im Realfahrzeug, möglicherweise auch als Folge der geringeren Stichprobe. Eine deutlich höhere Variabilität der Fahrsimulatordaten kann jedenfalls nicht nachvollzogen werden. Insgesamt wird also geschlossen, dass sich sowohl die statische als auch die dynamische Variante des



Simulators gleichermaßen für die valide Durchführung von querdynamisch geprägten Fahraufgaben auf Bahnführungsebene eignet.

In Bezug auf das Bremsverhalten muss auf dieser Ebene allerdings eine entgegengesetzte Aussage getroffen werden. Die Verzögerungswerte sind in beiden Simulatorkonfigurationen als deutlich zu hoch und damit extrem unrealistisch einzustufen. Erreicht werden negative Beschleunigungen von über 10 m/s^2 , die den Bereich der physikalischen Haftreibungsgrenze der Fahrzeugreifen erreichen. Im Vergleich dazu überschreiten die Bremsungen im Realfahrzeug im Mittel nicht einmal 2 m/s^2 . Gerade bei diesem Kennwert wäre im dynamischen Simulator eine Verbesserung durch das Nicken der Bewegungsplattform zu erwarten gewesen. Die hier erfassten Daten lassen keine präzisen Rückschlüsse auf mögliche Ursachen zu. In weiteren Versuchen wären der Bremsdruck, die Wahl der Bremspunkte auf der Strecke und insbesondere das Blickverhalten als geeignete Kennwerte für umfassendere Analysen zu ermitteln.

Weiterhin beschreiben Mullen et al. (2011) die generelle Tendenz einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit in Simulatoren. Dies kann nur für den Versuchsumfang zur Vertikaldynamik, nicht aber, wie gerade beschrieben, für die Querdynamikversuche bestätigt werden. Allerdings kann bei der Fahraufgabe der Querdynamik vermutet werden, dass durch die verhältnismäßig engen Kurvenradien eine weitere Steigerung der Fahrgeschwindigkeit die Fahrer in ihrer Lenkregeltätigkeit überfordert hätte. Im Versuch der Vertikaldynamik, der ausschließlich eine Gaspedalbetätigung erfordert, werden die Geschwindigkeiten des Realfahrzeugversuchs im Simulator um rund 10 % übertroffen. Hier wäre in weiteren Versuchen zu prüfen, auf welche Weise eine absolut valide Geschwindigkeit erreicht werden kann. Eine Möglichkeit besteht beispielsweise in der Skalierung der Plattformbewegung über reale Gegebenheiten hinaus, um stärkere vestibuläre Reize zu vermitteln.

Anders als auf Bahnführungsebene kann auf Stabilisierungsebene in der Versuchsreihe der Querdynamik weder im statischen noch im dynamischen Simulator von realitätsnahe und validem Fahrerverhalten gesprochen werden. Dadurch, dass im Simulatorversuch keine vollständig identische Lenkung des Realfahrzeugs abgebildet war, sind gewisse Abweichungen zu erwarten. Die hier festgestellte Größenordnung der Differenzen kann alleine damit aber nicht erklärt werden.

Die Lenkrückstellrate und die durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit zeigen mindestens eine Verdopplung der Werte, bei der Lenkfrequenz weichen die Werte von Simulator und Realfahrzeug sogar um das Zehnfache voneinander ab. Im Simulator ebenfalls deutlich erhöht sind die Lenkamplituden in Bezug auf die Standardabweichung wie auch das Maximum des Lenkradwinkels.



Als Fazit kann demnach gefolgert werden, dass schnellere, hektischere Lenkbewegungen mit größeren Amplituden in dem hier genutzten Fahrsimulator entstehen. Exemplarisch ist dies in Abbildung 5-34 anhand zweier Datensätze einer Realfahrzeug- und einer Simulatorfahrt verdeutlicht.

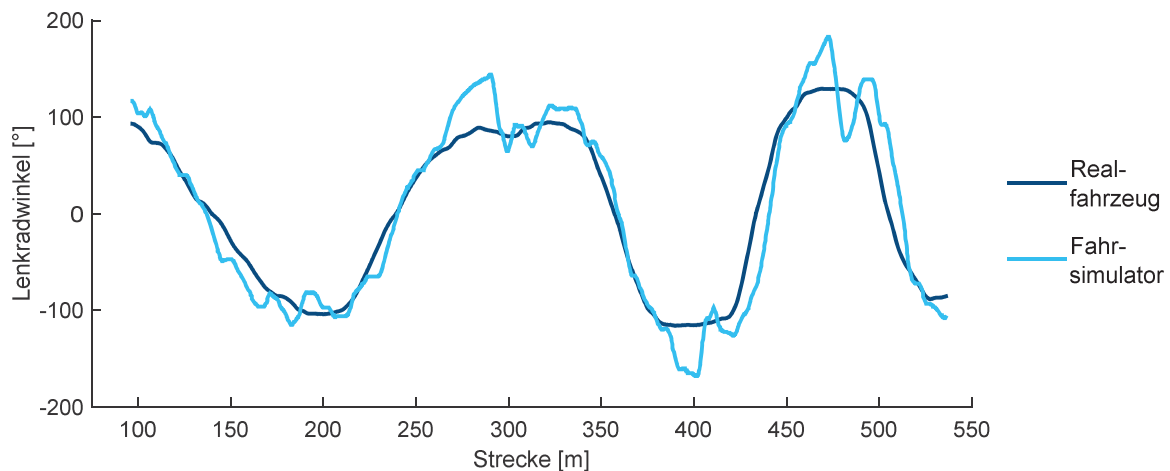


Abbildung 5-34: Exemplarischer Vergleich der Lenkbewegungen zwischen Realfahrzeug und Fahrsimulator in der Versuchsreihe der Querdynamik

Eine positive Veränderung durch die Nutzung der Bewegungsplattform bleibt aus, vielmehr kommt hier erschwerend die Richtung des Effekts hinzu. Anstelle einer erwarteten Verbesserung tritt eine zusätzliche, signifikante Entfernung von den Werten der Realfahrzeugversuche auf. Damit kann insbesondere der dynamischen Variante des Simulators keine Eignung zum Einsatz bei querdynamischen Fragestellungen auf Stabilisierungsebene attestiert werden.

Dies bedeutet aber nicht generell, dass vereinfachte Bewegungsplattformen im Bereich der Fahrdynamikdarstellung keine Daseinsberechtigung besitzen. Arioui, Hima, Nehaoua, Bertin und Espie (2011) erläutern das technische Konzept eines Low-Cost-Simulators, der neben einer Beweglichkeit in Längsrichtung einen Freiheitsgrad für Gierbewegungen aufweist. Dabei wird insbesondere der Mehrwert einer unskalierten Darstellung der Gierbewegungen des Fahrzeugs diskutiert. Wie bereits in Kapitel 2.3.4.2 beschrieben, werden im High-End-Bereich Systeme sogar mit redundantem Gierfreiheitsgrad ausgestattet.

Der Simulator der vorliegenden Arbeit ermöglicht mittels seiner Bewegungsplattform, wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, Nick-, Wank- und Vertikalbewegungen. Die Darstellung einer Kurvenfahrt erfolgt somit rein über die überlagerten Kippbewegungen um die Längs- und Querachse des Fahrzeugs, um die Aufbaubewegungen darzustellen. Gerade aber die Bewegungsmöglichkeit des Gierens fehlt. Da in Folge kein valides Fahrerverhalten erreicht wird, erscheint dieser Verzicht als nicht zielführend.



Insgesamt ist dies als weiterer Beleg dafür zu werten, dass Drehbewegungen um die Fahrzeughochachse ein realitätsnahes Erleben von Fahrverhalten im Bereich der Querdynamik, insbesondere auf Stabilisierungsebene, ermöglichen.

Weiterhin bestätigt die Versuchsreihe Querdynamik auch die in Kapitel 2.3.3 beschriebene Arbeit von Negele (2007). Der genutzte Simulator erscheint für Fragestellungen auf Bahnführungsebene geeignet, bei den zeitkritischeren Regeltätigkeiten auf Stabilisierungsebene ergeben sich dagegen klare Abweichungen zum Fahrerverhalten im Realfahrzeug.

5.4.4 Diskussion des Versuchsdesigns

Im Gegensatz zur Beschreibung von Auswirkungen der Bewegungsplattform kann zur Reliabilität von Simulatorversuchen nur eine eingeschränkte Aussage getroffen werden, da zwei wesentliche Faktoren eine präzisere Analyse verhindern. Zum einen wäre bei Effektstärken in relevanter Größenordnung eine Steigerung des Probandenkollektivs notwendig. Dies betrifft sowohl die subjektiven Daten zur Beurteilungsqualität aller Versuchsreihen als auch die objektiven Daten in der Versuchsreihe der Querdynamik. Weiterhin wird in der vorliegenden Arbeit lediglich eine Messwiederholung betrachtet, aus organisatorischen Gründen zudem in einem relativ kurzen zeitlichen Abstand. Eine Steigerung der Anzahl der Messzeitpunkte wie auch ein größerer Abstand zwischen den Messungen könnten hier zusätzliche Effekte in der virtuellen Umgebung eines Fahrersimulators aufzeigen.

Die Auswahl von Eigenschaften aus den verschiedenen Bereichen der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik erweist sich insofern als sinnvoll, da speziell im Bereich der Beurteilungsqualität, wie bereits im Realfahrzeug, große Diskrepanzen zwischen den Bewertungsergebnissen bestehen. Weiterhin zeigt sich die gesonderte Betrachtung von Bahnführung und Stabilisierung in der Versuchsreihe der Querdynamik als besonders wichtig. Nur so wird die unterschiedliche Eignung des Simulators erkennbar.

Kapitel 6

Probandenstudien zu Fahrsimulatortechnologie

Ausgehend von den Ergebnissen der Fahrsimulatorstudie zur Querdynamik wird im Weiteren eine Versuchsreihe gezeigt, die Galvanische Vestibuläre Stimulation zur verbesserten Darstellung von Beschleunigungen einsetzt. Analog zu Wiedemann, Remlinger und Bengler (2014a) wird diese Technik zunächst allgemein erklärt, daran schließt sich die Beschreibung der Probandenstudie an.

6.1 Galvanische Vestibuläre Stimulation

Galvanische Vestibuläre Stimulation (im Weiteren kurz: GVS) bezeichnet eine Technologie zur Beeinflussung der vestibulären Wahrnehmung. Mittels eines zwischen linker und rechter Kopfhälfte erzeugten Stromflusses wird die natürliche Reizübertragung im menschlichen Gleichgewichtsorgan überlagert und ein künstlicher Beschleunigungseindruck erzeugt.

6.1.1 Funktionsweise und Stand der Forschung

Erste Berichte über die Auswirkungen eines Stromflusses im Bereich des Gehörs und Gleichgewichtsorgans finden sich im Zusammenhang mit der Erforschung des elektrischen Stroms bereits Ende des 18. Jahrhunderts (Fitzpatrick & Day, 2004). Eine präzisere, wissenschaftliche Beschreibung des Phänomens liefert Breuer im 19. Jahrhundert (Breuer, 1874; Fitzpatrick & Day, 2004). Mit der Ableitung neuronaler Impulse in den Nervenbahnen beginnt die modernere Forschung auf diesem Gebiet, beispielsweise bei Goldberg, Fernandez und Smith (1982).

Der Stromfluss erfolgt zwischen Elektroden, die zumeist am Mastoid, dem Teil des Schläfenbeins hinter den Ohren, angebracht werden. Dadurch werden komplexe Effekte der Gleichgewichtswahrnehmung und der Körperhaltung sowie okulomotorische Phänomene ausgelöst (Curthoys & MacDougall, 2012). Abhängigkeiten bestehen zu der Position, Anzahl und Polarität der Elektroden. Neben Gleich- kann auch Wechselspannung eingesetzt werden, dabei zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Wirkweise von der Frequenz (Stephan et al., 2005). Im Rahmen der Arbeit wird die GVS-Technik zur Erzeugung von Beschleunigungswahrnehmung angewandt. Die weiteren Erklärungen beziehen sich deshalb vorwiegend auf diesen Aspekt sowie auf das eingesetzte System mit beidseitigen, bipolaren Elektroden mit angelegter Gleichspannung.

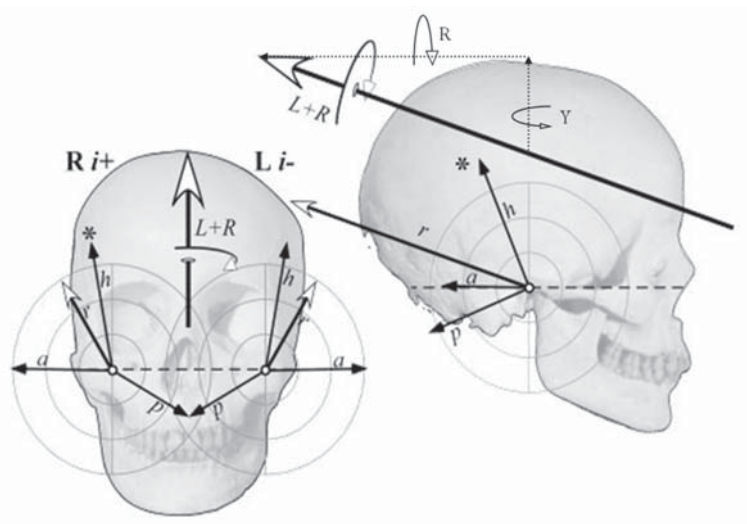


Abbildung 6-1: Vektorielle Betrachtung der neuronalen Impulse der einzelnen Bogengänge; gezeigt sind die Beschleunigungsvektoren des anterioren (a), posterioren (p) und horizontalen Bogengangs (h), der resultierende Vektor der linken bzw. rechten Seite (r) sowie die Vektorsumme der linken und rechten Kopfseite (L+R) mit den Wank- (R) und Gieranteilen (Y) (Fitzpatrick & Day, 2004).

Nach Fitzpatrick und Day (2004) überlagert der Stromfluss zwischen Kathode und Anode den natürlichen Transduktionsmechanismus in den Haarzellen der Bogengänge. Künstliche Signale



aller drei Bogengänge jeder Kopfseite werden so gleichzeitig in das neuronale Netz eingeleitet, vgl. Kapitel 2.2.2.3. Unter der Annahme, dass die Signalstärke aller Bogengänge gleich ist, kann die Wirkrichtung des GVS-Systems vektoriell ermittelt werden (Fitzpatrick & Day, 2004). Durch die räumliche Ausrichtung der Bogengänge neutralisieren sich einige Anteile der linken und rechten Kopfseite, andere ergänzen sich. Abbildung 6-1 verdeutlicht dies grafisch.

Bei aufrechter Kopfhaltung resultiert letztendlich eine Rotationsempfindung in Richtung der Kathode. Diese besteht, bezogen auf die aus dem Fahrzeug bekannten Bewegungsrichtungen, aus einer starken Wank- und leichten Gierbeschleunigung, vgl. Vektor R und Y in Abbildung 6-1. Die Intensität der Beschleunigungswahrnehmung korreliert dabei mit der Stromstärke. Da dieser Eindruck durchaus der Wahrnehmung während einer Kurvenfahrt im Fahrzeug gleichkommt, erscheint diese Technologie zur Erzeugung künstlicher Fahreindrücke geeignet.

6.1.2 Einsatz in virtuellen Umgebungen

Im medizinischen Kontext handelt es sich bei Galvanischer Vestibulärer Stimulation um eine gut erforschte und vielfach publizierte Technologie. Vermehrt werden aber auch Anwendungsbeispiele aus dem Bereich virtueller Technik veröffentlicht.

Mark (1985) beschreibt in seiner Patentschrift den allgemeinen technischen Aufbau eines GVS-Systems. Diskutiert wird zudem die Möglichkeit, Reisekrankheit in Fahrzeugen oder Flugzeugen zu reduzieren. Dieser Ansatz wird bei Reed-Jones, Reed-Jones, Trick und Vallis (2007) in einem statischen Fahrsimulator angewandt. Eine Probandenstudie mit 19 Teilnehmern zeigt eine signifikante Verbesserung hinsichtlich des Auftretens von Simulatorkrankheit. Weiterhin konnte in Kombination mit zusätzlichen visuellen Reizen eine verbesserte Kontrolle des Lenkverhaltens bei Einsatz des GVS-Systems nachgewiesen werden. In einer Versuchsreihe von Moore, Dilda und MacDougall (2011) wird die Verwendung in einem Flugsimulator geprüft. Die Ergebnisse belegen, dass Landeanflüge von Piloten eines Spaceshuttles realitätsnäher erfolgen, wenn das GVS-System aktiv ist. Ein weiteres Patent zu Technik und Methodik wurde Cevette, Stepanek und Galea (2011) zugeteilt. Darin beschrieben sind verschiedene Anwendungsfälle der Galvanischen Vestibulären Stimulation wie auch die Anbringung mehrerer Elektroden im Bereich der Stirn und des Nackens zur Erzeugung zusätzlicher Beschleunigungsrichtungen. Als Einsatzgebiet wird ebenfalls der Bereich der virtuellen Technologien genannt.

6.2 Zielsetzung und Versuchsdesign

Die beschriebenen Studien im vorangegangenen Kapitel belegen, dass Galvanische Vestibuläre Stimulation prinzipiell das Potential besitzt, das Realitätsempfinden in Simulatoren zu steigern. Inwieweit sich dadurch eine Verbesserung des Fahrerverhaltens und der Beurteilungsqualität erzeugen lässt, wird in einer weiteren Probandenstudie geprüft.

Verglichen werden drei Varianten, ein rein statischer Fahrsimulator mit und ohne GVS-System sowie die dynamische Variante des Fahrsimulators mit GVS-System. Als Anwendungsfall wird der Bereich der Querdynamik herangezogen. Dies erfolgt vor dem zuvor beschriebenen Hintergrund, dass das eingesetzte System Wank- und Gierbeschleunigungen erzeugt und somit vor allem den Querbeschleunigungsverlauf bei Kurvenfahrten realitätsnäher gestalten kann.

Zur Kopplung eines GVS-Systems mit einem Fahrsimulator bestehen nur wenige Erfahrungen. Daher ist die wesentliche Zielsetzung der Studie, eine grundsätzliche Bestätigung der Technologie herbeiführen zu können. Weitergehende Analysen, die unterschiedliche Parametrierungen des Systems ermöglichen, stehen nicht im Fokus. Erste Abschätzungen, inwieweit das verhältnismäßig günstige GVS-System die Bewegungsplattform eines Simulators ergänzen oder ersetzen kann, sollen aber getroffen werden. Die Beschreibungen zur Strukturierung der Versuchsreihe erfolgen analog zu Wiedemann et al. (2014a).

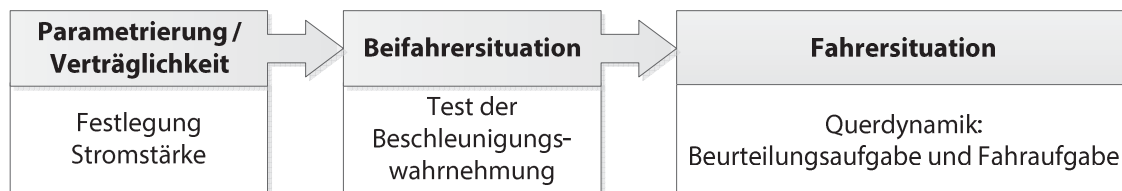


Abbildung 6-2: Schematischer Ablauf der GVS-Studie

Wie aus Abbildung 6-2 ersichtlich ist, erfolgt für den Probanden zunächst die individuelle Anpassung des GVS-Systems und eine erste grundsätzliche Prüfung auf Verträglichkeit des Systems. Im Anschluss wird die Beschleunigungswahrnehmung im Fahrsimulator als Beifahrer getestet. Der Hauptversuch erfolgt analog der Versuchsreihe Querdynamik der vorangegangenen Fahrsimulatorstudie, vgl. Kapitel 5.1.2, mit einer Beurteilungs- und einer Fahraufgabe.

6.2.1 Parameterermittlung und Verträglichkeitstest

Zur Parametrierung des GVS-Systems wird für jeden Probanden eine individuelle untere und obere Grenze der Stromstärke ($I_{\min}$ und $I_{\max}$) ermittelt. Zusätzlich wird die Verträglichkeit des Systems hinsichtlich Schwindel- oder Übelkeitsgefühlen analysiert. Die Fragestellungen, die in diesem ersten Versuchsteil beantwortet werden sollen, sind in Abbildung 6-3 zusammengefasst:



Thesen zur Parametrierung und Verträglichkeit des GVS-Systems		Kennwert
Parametrierung	Die Intensität des Beschleunigungseindrucks wird von starken interindividuellen Unterschieden geprägt. Damit ist eine Anpassung des Systems hinsichtlich der Stromstärke notwendig.	$I_{\min} / I_{\max}$
Verträglichkeit	Das Wohlbefinden der Probanden verändert sich bei Verwendung des GVS-Systems nicht.	Simulator Sickness Questionnaire

Abbildung 6-3: Thesen und zugehörige Kennwerte zur Parametrierung und Verträglichkeit des GVS-Systems

Eine detaillierte Beschreibung der eingesetzten Staircase-Methode zur Bestimmung der Stromstärke sowie der Übertragung der Werte in das GVS-System sind im Anschluss in Kapitel 6.3 beschrieben.

Die Verträglichkeit des Systems wird mit dem Simulator Sickness Questionnaire nach Kennedy, Lane, Berbaum und Lilienthal (1993) erfasst. Dazu werden von den Probanden insgesamt 16 Kriterien zur Unverträglichkeit von Simulatoren in vier Stufen von „nicht vorhanden“ bis „sehr deutlich vorhanden“ bewertet. Prinzipiell existiert die Möglichkeit, die Kriterien zu übergeordneten Gruppen zusammenzufassen. In neueren Analysen des Fragebogens wird die Gültigkeit der Gruppeneinteilung allerdings angezweifelt, während die Kriterien insgesamt als aussagekräftig erachtet werden (vgl. Balk, Bertola & Inman, 2013). Deshalb wird bei der Beschreibung der Ergebnisse auf eine Einzeldarstellung zurückgegriffen.

Die Datenerhebung mittels des Simulator Sickness Questionnaire findet zu Beginn der Parametermittlung und nach Abschluss aller Simulatorfahrten statt, um Auswirkungen einer länger andauernden Einwirkung der Galvanischen Vestibulären Stimulation in Kombination mit einem Fahrsimulator zu ermitteln.

6.2.2 Test der Beschleunigungswahrnehmung

Im zweiten Versuchsteil nutzt der Proband das GVS-System in Beifahrersituation im statischen Fahrsimulator. Der Versuchsleiter befährt dazu den in Kapitel 5 beschriebenen Handlingkurs mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit von etwa 50 km/h. Nach Test- und Eingewöhnungsfahrten mit geöffneten Augen soll der Proband in zwei weiteren Fahrten bei geschlossenen Augen die Richtung der jeweiligen Kurve angeben. Folgende Thesen sollen dazu geklärt werden:



Thesen zur Beschleunigungswahrnehmung		Kennwert
Beschleunigungswahrnehmung	Der vermittelte Beschleunigungseindruck entspricht einer Kurvenfahrt in Bezug auf Richtung, Intensität und Zeitpunkt des Auftretens bzw. zeitlichen Verlaufs.	Subjektivbewertung (Likert-Skala)
	Der Kurvenverlauf kann ausschließlich mittels der Beschleunigungseindrücke des GVS-Systems nachvollzogen werden.	Erkennungsquote Kurvenrichtung

Abbildung 6-4: Thesen und zugehörige Kennwerte zur Beschleunigungswahrnehmung mittels des GVS-Systems

Die subjektiven Eindrücke der Probanden in Bezug auf Intensität, Richtung und zeitlich korrektem Auftreten des Reizes werden in Form einer siebenstufigen Likert-Skala erhoben. Die Erkennungsquote der Kurvenrichtung definiert sich als Anzahl der richtigen Aussagen im Verhältnis zur Gesamtzahl der Kurven. Neben falschen Nennungen wird zusätzlich vermerkt, falls keine Kurvenrichtung erkannt wird.

6.2.3 Versuchsreihe Querdynamik mit GVS-System

Der Hauptversuch der GVS-Studie ist im Aufbau identisch zur Versuchsreihe Querdynamik in Kapitel 5. Die **Fahraufgabe** entspricht wieder dem zügigen Befahren des Handlingkurses, zusätzlich ist als **Beurteilungsaufgabe** die Lenkungscharakteristik zu identifizieren. Eine Fahrtwiederholung erfolgt hier allerdings nicht.

6.2.3.1 Versuchsfaktoren

Für die Umsetzung der Beurteilungsaufgabe ist wie in den Versuchsreihen zuvor der Faktor Lenkungscharakteristik mit den Stufen comfort und dynamic notwendig. Der Faktor der Simulatorkonfiguration kombiniert in drei verschiedenen Stufen den Einsatz der Bewegungsplattform mit dem GVS-System. Insgesamt ergeben sich somit sechs Kombinationsmöglichkeiten.

Tabelle 6-1: Faktoren der GVS-Versuchsreihe Querdynamik

Faktor	Simulatorkonfiguration	Lenkungscharakteristik
Stufen	Simulator statisch	comfort
	Simulator statisch mit GVS	dynamic
	Simulator dynamisch mit GVS	

6.2.3.2 Hypothesen und zugehörige Kennwerte

Die Hypothesen treffen Aussagen zur Beurteilungsqualität und dem Fahrerverhalten bei zusätzlichen vestibulären Informationen, welche durch das GVS-System entstehen:



Hypothesen und Kennwerte der GVS-Versuchsreihe Querdynamik Faktor Simulatorkonfiguration (Bewegungsplattform / GVS-System)			Kennwert
Beurteilungsqualität	H0	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems wirken sich nicht auf das Differenzieren der Lenkungscharakteristik aus.	Differenzierungsfähigkeit
	H1	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems erhöhen die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems wirken sich nicht auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Lenkungscharakteristik aus.	Beurteilungssicherheit
	H1	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems erhöhen die Beurteilungssicherheit.	
Fahrerverhalten	H0	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems haben keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Bahnführungsebene.	5 Kennwerte der Bahnführungsebene
	H1	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems verändern das Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene.	
	H0	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems haben keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Stabilisierungsebene.	5 Kennwerte der Stabilisierungsebene
	H1	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems verändern das Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene.	

Abbildung 6-5: Hypothesen und erhobene Kennwerte der GVS-Versuchsreihe Querdynamik – Faktor Simulatorkonfiguration

Die erhobenen Kennwerte werden bereits in Kapitel 4 und Kapitel 5 eingesetzt, nähere Beschreibungen und Hinweise zur inferenzstatistischen Bewertung können den dortigen Textpassagen entnommen werden.

6.3 Realisierung des Versuchsdesigns

Bei der Umsetzung des Versuchsdesigns wird im Besonderen auf den technischen Aufbau des GVS-Systems, die Parametrierung und die Anbindung an den Fahrsimulator eingegangen. Der weitere Aufbau des Fahrsimulators und die Gestaltung der Fahrstrecke kann der Beschreibung in Kapitel 5 entnommen werden.

6.3.1 Aufbau des GVS-Systems

Das GVS-System setzt sich aus einem Kopfhörer, einer Sende- und Empfangseinheit sowie einer Ansteuerungssoftware zusammen. Am Kopfhörer sind Klebeelektroden, die an der Stelle des Mastoids zum Liegen kommen, und der Anschluss für die Empfangseinheit angebracht. In dieser befinden sich ein Funkempfänger für die Übertragung der Signale der Sendeeinheit sowie ein Gleichspannungs-Konverter, der die Spannung der angeschlossenen 12V-Batterie erhöht. Zur Definition des maximalen Stroms ist ein Drehpotentiometer zwischengeschaltet, diese Begrenzung kann redundant auch über die Software erfolgen. Die übertragene Stromstärke wird maßgeblich von der Größe und Beschaffenheit der Elektroden beeinflusst. Bei dem hier eingesetzten System wird der maximale Wert auf 3,3 mA beschränkt. Die Funkübertragung der Signale von Ansteuerungsrechner zu Kopfhörer erfüllt zweierlei Anforderungen. Zum einen wird der Proband mit dem Gerät nicht in seiner Bewegungsfreiheit eingeschränkt, zum anderen besteht aus Sicherheitsgründen eine physikalische Trennung zwischen der Kopfhörereinheit und Geräten, die am Stromnetz angeschlossen sind. Die Ansteuerungssoftware gibt neben dem Signal für die Stromstärke auch die Polarität der Elektroden vor, um Beschleunigungen in beide Richtungen darstellen zu können.

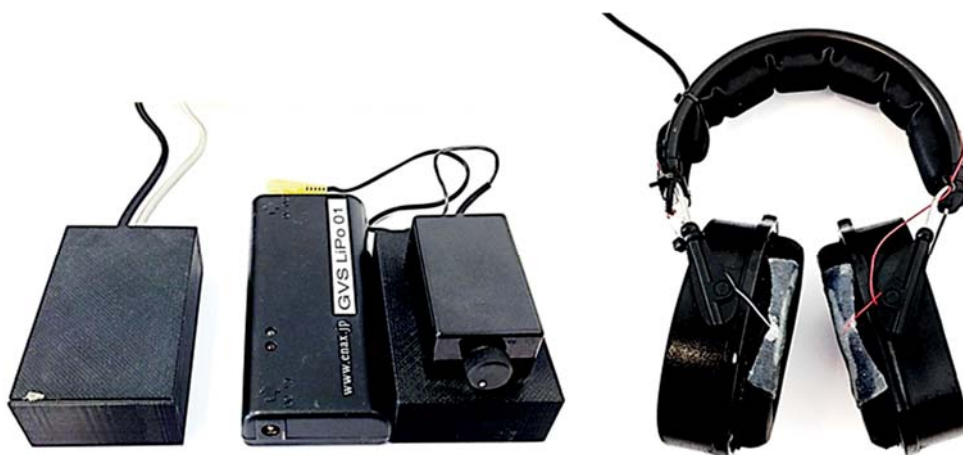


Abbildung 6-6: GVS-System bestehend aus der Sendeeinheit, der Empfangseinheit mit Batterie und Drehpotentiometer sowie dem Kopfhörer mit Klebeelektroden



Zur Ermittlung der minimalen und maximalen Stromstärke kann mit Hilfe der Software die Stromstärke beliebig oder in festen Schrittweiten variiert werden. Zur Kontrolle wird während der Parameterbestimmung zwischen Funkempfänger und Kopfhörereinheit zusätzlich ein Strommessgerät geschaltet.

6.3.2 Ermittlung der Grenzwerte der Stromstärke

Wie zuvor beschrieben, müssen die Grenzen eines individuellen Bereichs, in dem die Stromstärke variiert werden kann, definiert werden. Die Festlegung eines Maximalwertes ist notwendig, da an der Stelle der Elektroden Reizungen der Haut entstehen können. Bereits in Vorversuchen wurde dabei eine stark interindividuelle Schmerzempfindung, die von der Stromstärke abhängig ist, festgestellt. Um eine derartige Beeinträchtigung der Probanden auszuschließen, wird die Stromstärke schrittweise bis zum Erreichen der Schmerzgrenze erhöht. Dies wird im Sitzen bei gerader Kopfhaltung einmal durch den Versuchsleiter und zur Bestätigung des Ergebnisses wiederholt durch den Probanden selbst durchgeführt. Weiterhin erfolgt die Ausführung sowohl links- als auch rechtsseitig, da auch intraindividuelle Unterschiede bestehen können.

Zur Festlegung der minimalen Stromstärke, die einen noch wahrnehmbaren Reiz erzeugt, wird eine Staircase-Methode angewandt. Dieses Verfahren der Psychophysik nutzt eine wiederholte Darbietung eines Reizes in unterschiedlichen, definierten Stufen. Der Reiz wird zunächst solange erniedrigt, bis er nicht mehr wahrgenommen wird, anschließend wieder schrittweise erhöht. Nach einem erneuten Erkennen erfolgt wieder eine Reizverkleinerung, wodurch letztendlich eine Verlaufskurve mit mehreren Umkehrpunkten resultiert. (vgl. Kingdom & Prins, 2010)

Um mit wenigen Reizdarbietungen ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen, wird eine abgewandelte Form nach Wetherill und Levitt (1965) genutzt. Diese erfordert drei richtige Antworten, um den Reiz zu verringern, dagegen wird bei einer falschen Antwort der Reiz bereits bei der nächsten Darbietung wieder erhöht. Die Schrittweite der Stufen nach oben und unten wird gleich groß gewählt. Nach Kingdom und Prins (2010) liegt bei dem in dieser Form angewandten Verfahren die Entdeckungswahrscheinlichkeit bei 79,37 %. Nach Erreichen des Abbruchkriteriums, das für diese Versuchsreihe als achter Umkehrpunkt definiert ist, wird aus diesen Maximal- und Minimalwerten das arithmetische Mittel als Wahrnehmungsschwelle gebildet. Die Anwendung des Verfahrens erfolgt wiederum im Sitzen, getrennt für die linke und rechte Seite.

6.3.3 Parametrierung des GVS-Systems

Für die Nutzung des GVS-Systems im Fahrsimulator werden die ermittelten Grenzwerte der Stromstärke einem Wert der Querschleunigung im Fahrdynamikmodell des Fahrsimulators



zugeordnet. Dazu dient ebenfalls die zuvor beschriebene Ansteuerungssoftware, die die Schnittstelle zwischen GVS-System und Fahrdynamikmodell bildet.

Die festgestellte Stromstärke an der Wahrnehmungsschwelle wird einer Querbeschleunigung von 2 m/s^2 zugewiesen. Unter oftmals klinischen Versuchsbedingungen ermittelte Werte, wie in Tabelle 2-1 dargestellt, liegen prinzipiell auf niedrigerem Niveau. Vorversuche legen aber den Schluss nahe, einen höheren Wert anzusetzen, da damit ein realistischeres Fahrgefühl erzielt wird. Wie bei Wiedemann et al. (2014a) beschrieben, wird angenommen, dass die gleichzeitige Wahrnehmung verschiedener Sinneseindrücke im Fahrzeug zu einer höheren Wahrnehmungsschwelle für die Querbeschleunigung während der Fahraufgabe führt. Das ermittelte Maximum der Stromstärke wird einer Querbeschleunigung von 11 m/s^2 zugeordnet. Dieser Wert entspricht den gemessenen Spitzenwerten der Realfahrzeugstudie und bildet das im Fahrdynamik- bzw. Reifenmodell hinterlegte fahrphysikalische Maximum des simulierten Fahrzeugs.

6.3.4 Stichprobenbeschreibung

An den Versuchen im März 2014 nahmen 15 Mitarbeiter der AUDI AG im Rahmen ihrer regulären Arbeitszeit teil. Durch die Tätigkeit in der Technischen Entwicklung entsprechen sie dem in Kapitel 3.2.1 geforderten Probandenprofil. Grundvoraussetzung einer Teilnahme war zusätzlich, dass keine Erkrankungen und Störungen des Gleichgewichtssinns bekannt waren. Tabelle 6-2 zeigt die wesentlichen Daten.

Tabelle 6-2: Probandenkollektiv der Versuche zum Einsatz eines GVS-Systems
im Fahrsimulator (n=15)

Alter	30,1 Jahre (5,7 Jahre)
Mittelwert (Standardabw.)	
Anteil Männer	93 %
Fahrerfahrung	12,1 Jahre (5,7 Jahre)
Mittelwert (Standardabw.)	

Im Sinne einer Machbarkeitsstudie wird auf eine größere Probandenzahl verzichtet. Geht man von den in den vorangegangenen Studien angenommenen Korrelationen von $\bar{r} \geq .6$ zur Berechnung der Teilnehmerzahl aus, genügt der Stichprobenumfang von 15 Personen dennoch, um mittlere Effekte bis zu einer Größe von $\eta_p^2 \geq .08$ bei einem Fehler 1. Art von $\alpha = .05$ und einer Teststärke von $1-\beta = .80$ bewerten zu können.



6.4 Ergebnisse

Die Ergebnisdarstellung geht zunächst auf die Messwerte zu den Parametern des GVS-Systems ein, gefolgt von den subjektiven Daten und den objektiven Kennwerten des Fahrerverhaltens. Im Anhang A.3 der Arbeit sind die objektiven Ergebnisse in verkürzter, tabellarischer Form abgebildet.

6.4.1 Parametrierung und Verträglichkeit

Die Maximalwerte der gewünschten Stromstärke betragen im Mittel auf der linken Seite 2,9 mA, auf der rechten Seite 2,8 mA bei einer Standardabweichung von 0,5 bzw. 0,6 mA. Demnach liegen sie nur geringfügig unter dem technisch möglichen Maximum von 3,3 mA. Die hier gewählte Boxplot-Darstellung verdeutlicht aber, dass vereinzelt durchaus auch Werte von 1,5 mA bereits den Grenzwert bilden. Insgesamt betrachtet resultiert daraus eine Überlappung mit dem Wertebereich der Wahrnehmungsschwelle. Als Mittelwerte der Stromstärke für gerade noch erkannte Beschleunigungen werden jeweils 1,4 mA bei einer Standardabweichung von 0,6 bzw. 0,7 mA ermittelt. Auch hier finden sich interindividuell stark heterogene Ergebnisse, der absolute Minimalwert bei Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle beträgt 0,4 mA, der Maximalwert dagegen 2,8 mA. Größere Abweichungen zwischen der Beschleunigungsrichtung nach links oder rechts sind nicht feststellbar.

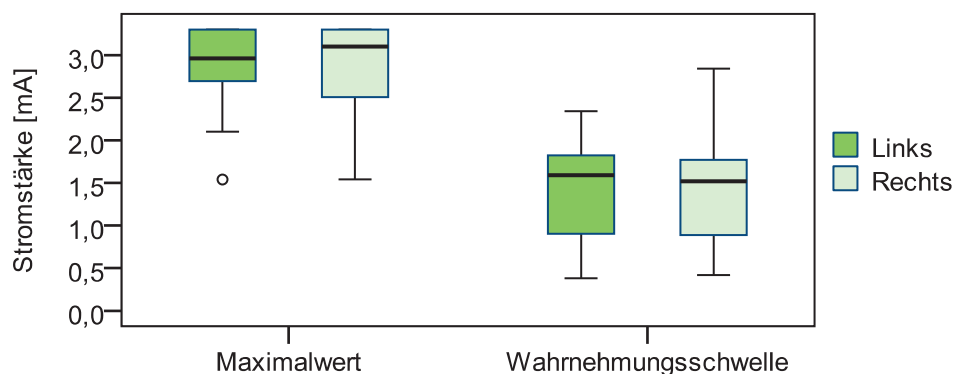


Abbildung 6-7: Maximal- und Minimalwert der eingesetzten Stromstärke, n = 15

Bei der Angabe dieser Werte ist zu beachten, dass diese ausschließlich für die hier verwendeten Klebeelektroden Gültigkeit besitzen. Die Wahl anderer Elektroden hat erheblichen Einfluss auf die benötigte Stromstärke (vgl. Wiedemann et al., 2014a).

Die Bewertungsskala des Simulator Sickness Questionnaire bietet prinzipiell die Möglichkeit bei sehr starken Symptomen des Unwohlseins drei Bewertungspunkte zu vergeben. Wie aus dem Diagramm ersichtlich wird, treten nur sehr geringe Durchschnittswerte auf, die 0,6 Punkte nicht überschreiten. In einigen Kategorien, die Schwindel oder Übelkeit erfassen, werden zum Ende

des Versuchs marginal höhere Bewertungen erreicht. In anderen Kategorien sind allerdings auch Verbesserungen des Wohlbefindens ersichtlich.

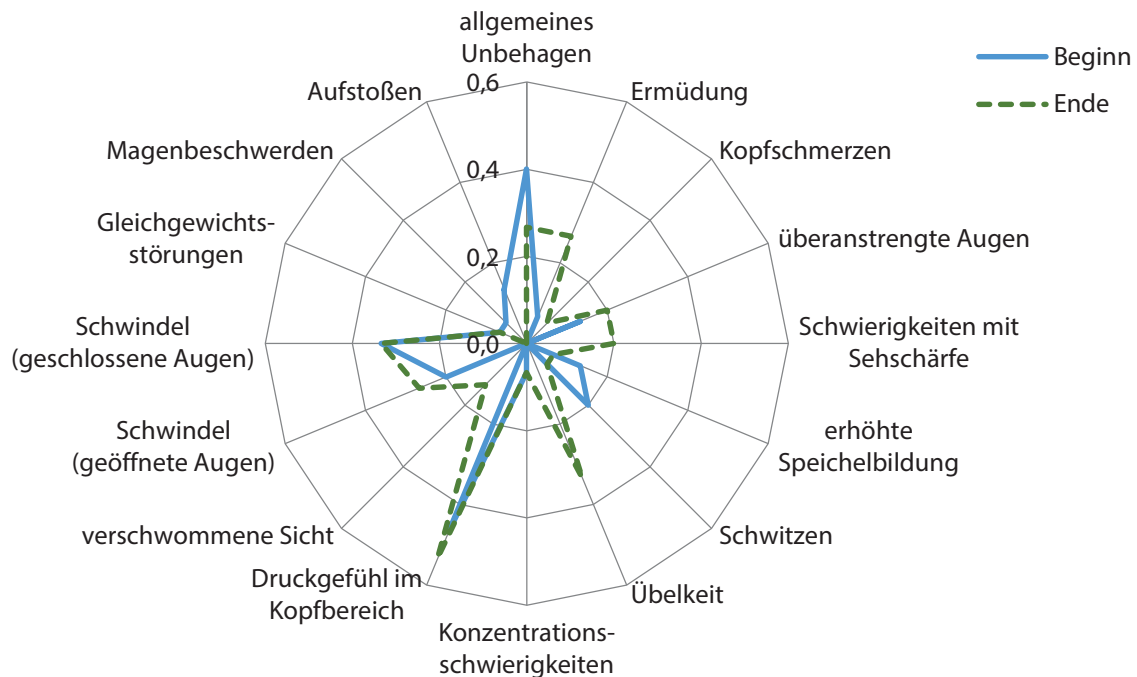


Abbildung 6-8: Bewertungen des Simulator Sickness Questionnaire (Darstellung mit reduzierter Skala 0 bis 0,6 Punkte, theoretisch möglicher Wertebereich 0 bis 3 Punkte), $n = 15$

6.4.2 Subjektive Daten zur Beschleunigungswahrnehmung

Bei der Kurvenfahrt in Beifahrersituation werden 63,3 % der Kurven von den 15 Versuchspersonen anhand der vestibulären Reize richtig erkannt. Bei weiteren 22,0 % erfolgt keine Nennung einer Richtung, der Proband nimmt die Kurve nicht wahr. In 14,7 % der Fälle wird die falsche Kurvenrichtung angegeben. Die Beobachtung der Probanden lässt vermuten, dass dies nicht ausschließlich auf eine falsche Richtungswahrnehmung, sondern auch auf einen zeitlichen Versatz in der Reizverarbeitung zurückzuführen ist.

Als Fahrer mit GVS-System wird das Richtungsempfinden verhältnismäßig realistisch eingeschätzt, der Median befindet sich bei +1. Die Bewertung der Intensität fällt geringfügig schlechter aus, wird mit +0,5 Punkten insgesamt jedoch positiv angegeben. Durchaus werden aber auch Bewertungen im negativen Bereich der Skala vorgenommen. Diese Beobachtung ist ebenso auf den Zeitpunkt der Beschleunigungsempfindung übertragbar, allerdings bei geringerem Interquartilsabstand, mit einem Median von +1. Zwischen der Beschleunigungsrichtung nach links oder rechts treten lediglich bei der Intensitätsbewertung leichte Differenzen auf.

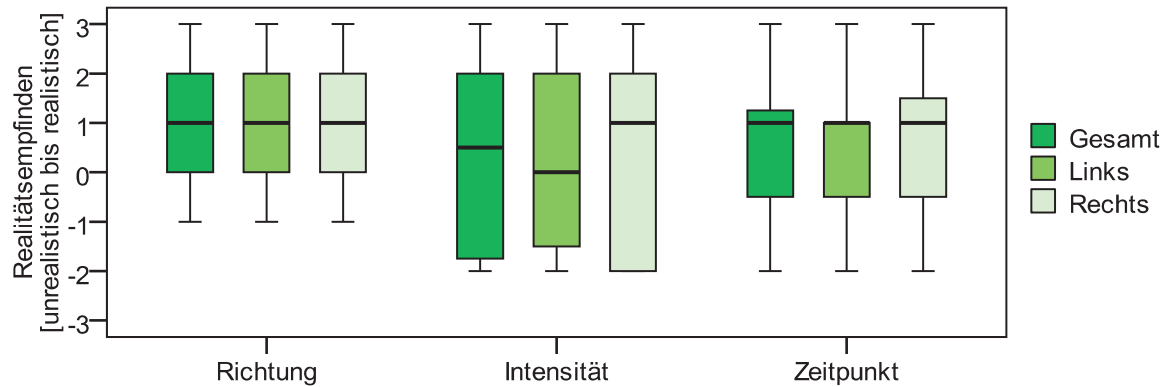


Abbildung 6-9: Subjektive Bewertung der Richtung, der Intensität und des Zeitpunkts der Beschleunigungsempfindung bei Nutzung des GVS-Systems, n = 15

6.4.3 Subjektive Daten der Beurteilungsqualität

Die aus Kapitel 5 bekannte, hohe Quote richtiger Antworten bei der Differenzierung der Lenkungscharakteristik wird auch in dieser Versuchsreihe bestätigt. Die besten Ergebnisse werden im statischen Simulator mit GVS-System erzielt, gefolgt vom dynamischen Simulator mit GVS-System. Im rein statischen Simulator liegt die **Differenzierungsfähigkeit** um 10 % niedriger, aufgrund der geringen Probandenzahl entspricht dies aber lediglich drei veränderten Antworten. Statistisch nachweisbare Unterschiede treten nicht auf, $\chi^2(2) = 1.17$; $p = .56$; $\omega = .20$; $1-\beta = .24$.

Tabelle 6-3: Differenzierungsfähigkeit hinsichtlich der Lenkungscharakteristik, n = 30

Simulator	Anzahl richtig [-]	Anzahl falsch [-]	Differenzierungsfähigkeit [%]
Statisch	22	8	73,3
Statisch mit GVS	25	5	83,3
Dynamisch mit GVS	23	7	76,7

Die **Beurteilungssicherheit** wird bei den Fahrten mit statischem Simulator mit einem Median von 5 bewertet, im Fall des dynamischen Simulators als geringfügig schwieriger mit 6 Punkten. Dagegen ist in dieser Stufe die Spreizung zwischen richtiger und falscher Differenzierung in Bezug auf den Median am deutlichsten nachvollziehbar. In den anderen beiden Stufen wird sie überwiegend durch die unterschiedliche Lage der Box erkennbar. Es ergeben sich keine statistisch signifikanten Abweichungen beim Vergleich aller Bewertungen, $\chi^2(2) = 1.85$; $p = .40$;

$\omega = .25$; $1-\beta = .21$. Auch die Breite der Verteilungen bietet kein klares Bild, der Interquartilsabstand des statischen Simulators mit GVS ist am kleinsten, dafür enthält diese Stufe die größte Streuung des oberen und unteren Quartils.

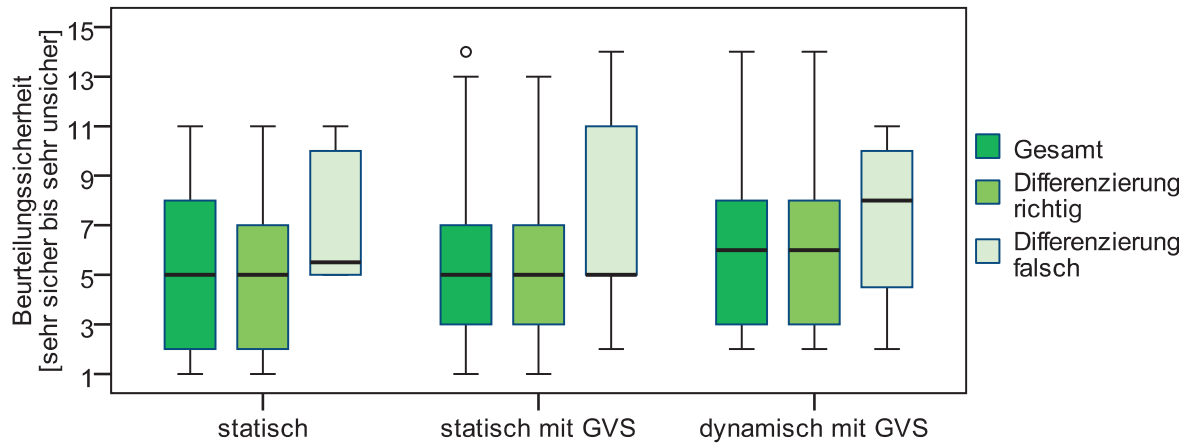


Abbildung 6-10: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Lenkungscharakteristik (Gesamt: $n = 30$), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung

6.4.4 Objektive Daten des Fahrerverhaltens

Bei den objektiven Daten werden die Ergebnisse getrennt nach der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene vorgestellt.

6.4.4.1 Kennwerte der Bahnführungsebene

Die durchschnittlich erzielten **Fahrgeschwindigkeiten** der Probanden bilden einen sehr engen Bereich von ca. 1 km/h. Dementsprechend können keine Veränderungen hinsichtlich des Faktors der Lenkungscharakteristik beobachtet werden, $F(1; 14) = .29$; $p = .60$; $\eta_p^2 = .02$; $1-\beta = .17$.

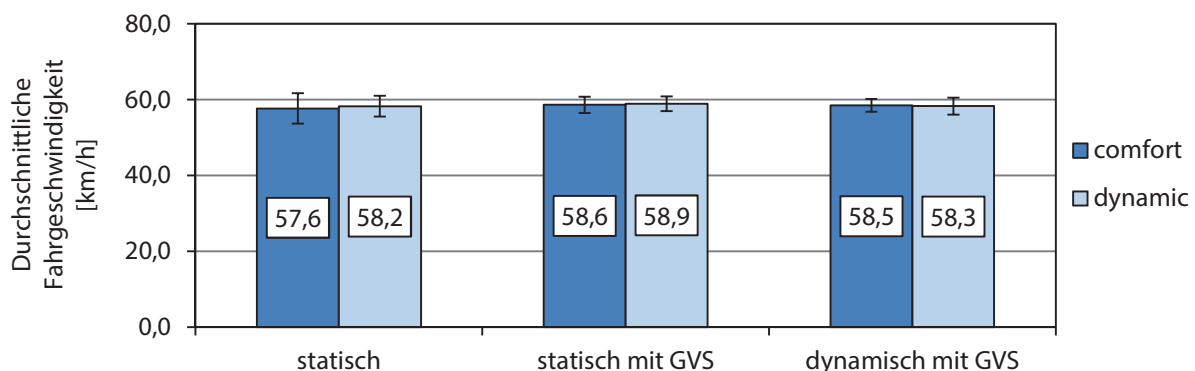


Abbildung 6-11: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, $n = 15$



Auch Einflüsse des GVS-Systems lassen sich nicht nachweisen, $F(1.66; 23.18) = .94$; $p = .39$; $\eta_p^2 = .06$; $1-\beta = .40$. Die Verletzung der Sphäritätsannahme erfordert in diesem Fall eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Huynh-Feldt, $\varepsilon = .83$.

Wie aus der vorangegangenen Fahrsimulatorstudie bekannt, werden bei den auftretenden Bremsungen durchgängig sehr hohe Verzögerungswerte im Bereich des fahrphysikalischen Maximalwerts verzeichnet.

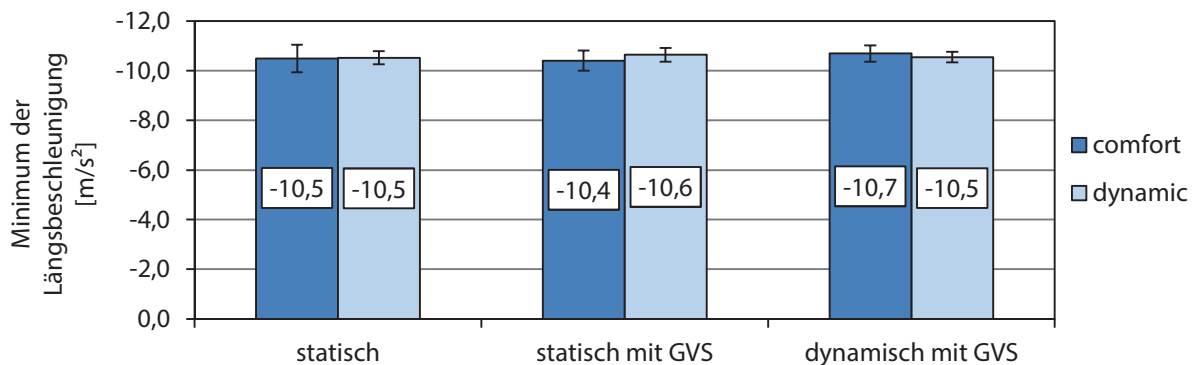


Abbildung 6-12: Minimum der Längsbeschleunigung, n = 15

Das GVS-System führt zu keiner Veränderung des **Minimums der Längsbeschleunigung**, $F(2; 28) = 1.00$; $p = .38$; $\eta_p^2 = .07$; $1-\beta = .34$. Ein Einfluss der Lenkungscharakteristik auf das Bremsverhalten ist nicht zu vermuten und bei sehr geringer Teststärke nicht nachweisbar, $F(1; 14) = .26$; $p = .62$; $\eta_p^2 = .02$; $1-\beta = .12$.

Die **durchschnittlichen Querbeschleunigungen** liegen bei aktivem GVS-System nur marginal höher als bei der Referenzfahrt im statischen Simulator. Weder für den Faktor Simulatorkonfiguration, $F(2; 28) = 1.51$; $p = .24$; $\eta_p^2 = .10$; $1-\beta = .68$, noch für die Lenkungscharakteristik, $F(1; 14) = .06$; $p = .81$; $\eta_p^2 = .004$; $1-\beta = .08$, ist ein Einfluss auf diesen Kennwert feststellbar.

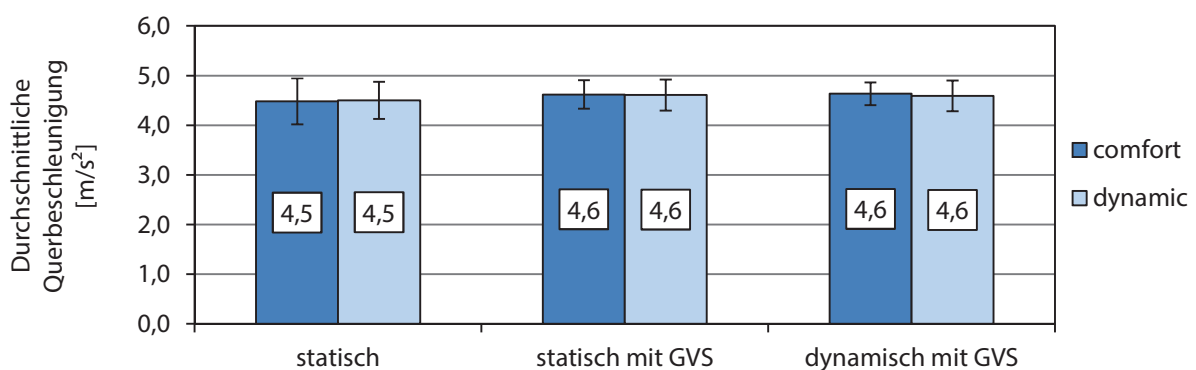


Abbildung 6-13: Durchschnittliche Querbeschleunigung, n = 15

Signifikant höhere **Maximalwerte der Querbeschleunigung** treten bei Verwendung der dynamic-Stufe der Lenkungscharakteristik auf, $F(1; 14) = 47.65$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .77$; $1-\beta = 1.0$. Im dynamischen Simulator mit GVS-System werden die höchsten Werte im Vergleich der drei Simulatorkonfigurationen erzeugt. Dies stellt aber keinen signifikanten Unterschied dar, $F(2; 28) = 1.19$; $p = .32$; $\eta_p^2 = .08$; $1-\beta = .54$.

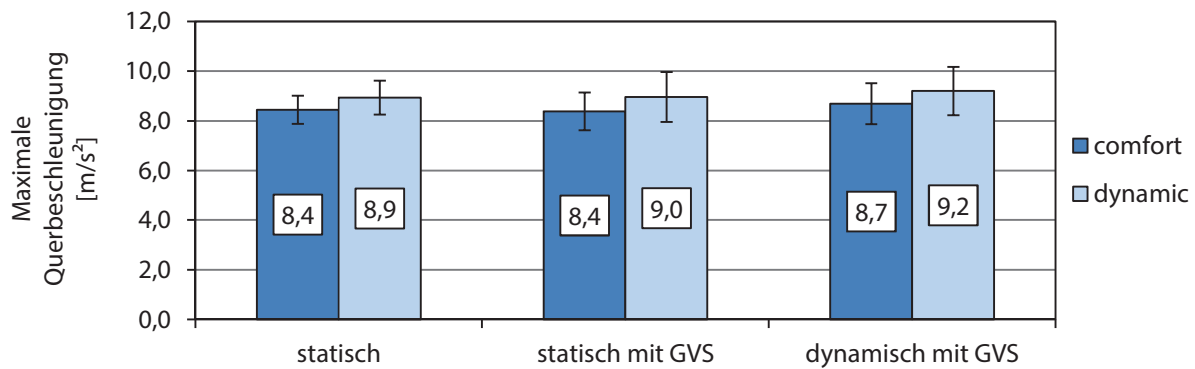


Abbildung 6-14: Maximale Querbeschleunigung, n = 15

Auch die **durchschnittliche Giergeschwindigkeit** wird bei Verwendung des GVS-Systems in Kombination mit der Bewegungsplattform des Simulators am deutlichsten gesteigert, das GVS-System alleine bewirkt eine geringere Veränderung. Die Varianzanalyse zeigt jedoch keinen signifikanten Unterschied der drei Stufen der Simulatorkonfiguration an, $F(1.58; 22.07) = 2.88$; $p = .09$; $\eta_p^2 = .17$; $1-\beta = .77$. Zur Berechnung erfolgt eine Korrektur nach Huynh-Feldt, $\epsilon = .79$. Zwischen der comfort- und dynamic-Stufe der Lenkungscharakteristik weichen die Werte kaum ab, $F(1; 14) = .17$; $p = .69$; $\eta_p^2 = .01$; $1-\beta = .11$.

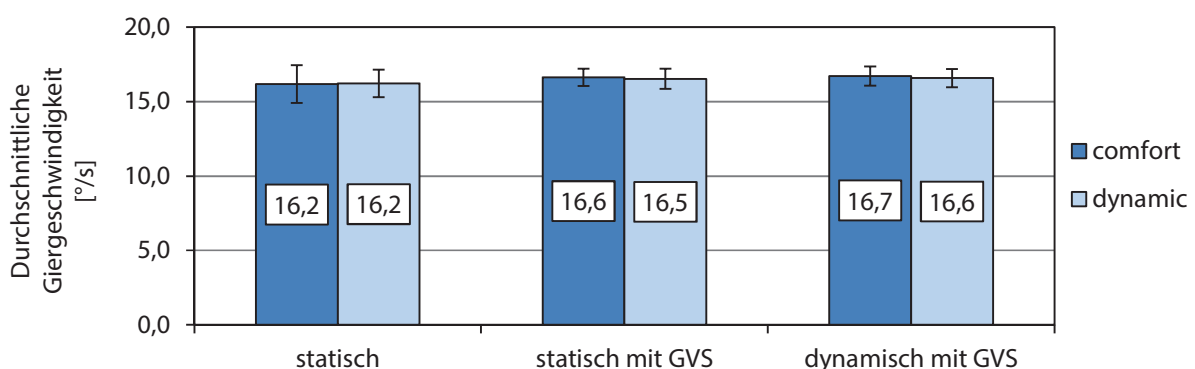


Abbildung 6-15: Durchschnittliche Giergeschwindigkeit, n = 15



6.4.4.2 Kennwerte der Stabilisierungsebene

Die niedrigsten Werte der **Lenkradwinkelgeschwindigkeit** werden mit dem statischen Simulator in Verbindung mit dem GVS-System erreicht. Bei zusätzlichem Einsatz der Bewegungsplattform ist ein deutlicher Anstieg feststellbar. Die Werte des statischen Simulators ohne GVS-System befinden sich zwischen diesen beiden Stufen. Für einen statistisch nachweisbaren Trend sind die Unterschiede des Faktors Simulatorkonfiguration allerdings zu schwach ausgeprägt, $F(2; 28) = 2.73$; $p = .08$; $\eta_p^2 = .16$; $1-\beta = .96$. Auch die Stufe der dynamic-Lenkung liegt durchgängig, aber nicht signifikant unter dem Niveau der comfort-Lenkung, $F(1; 14) = 2.00$; $p = .18$; $\eta_p^2 = .13$; $1-\beta = .90$.

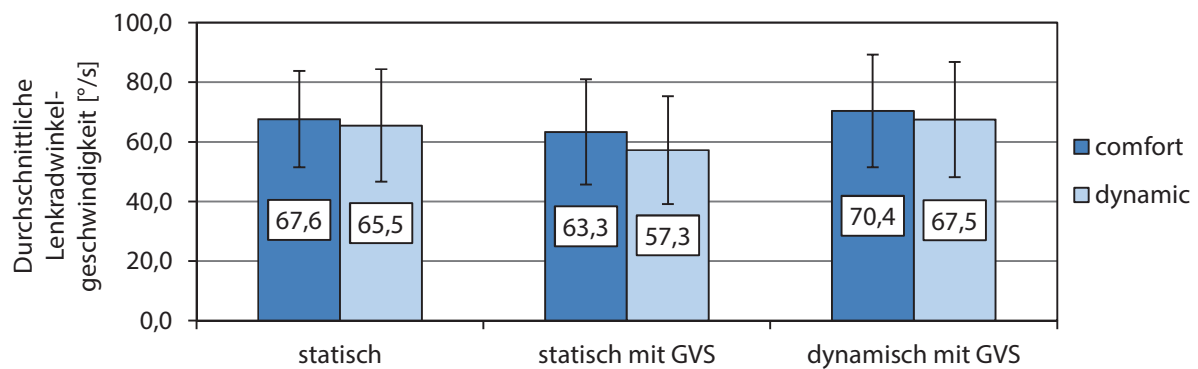


Abbildung 6-16: Durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit, n = 15

Die geringsten Werte der **Standardabweichung des Lenkradwinkels** ergeben sich wiederum bei der Kombination aus statischem Simulator und GVS-System, gefolgt vom dynamischen Simulator mit GVS-System. Die höchsten Werte werden ohne diese zusätzliche Technik im rein statischen Simulator erzielt. Das Ergebnis der statistischen Betrachtung ist hochsignifikant, $F(2; 28) = 6.64$; $p = .004$; $\eta_p^2 = .32$; $1-\beta = 1.0$. Die Unterschiede finden sich zwischen dem statischen Simulator mit GVS-System und der rein statischen Variante, $p = .015$. Die Werte der comfort-Lenkung weichen hochsignifikant von der dynamic-Stufe ab, $F(1; 14) = 21.01$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .60$; $1-\beta = 1.0$.

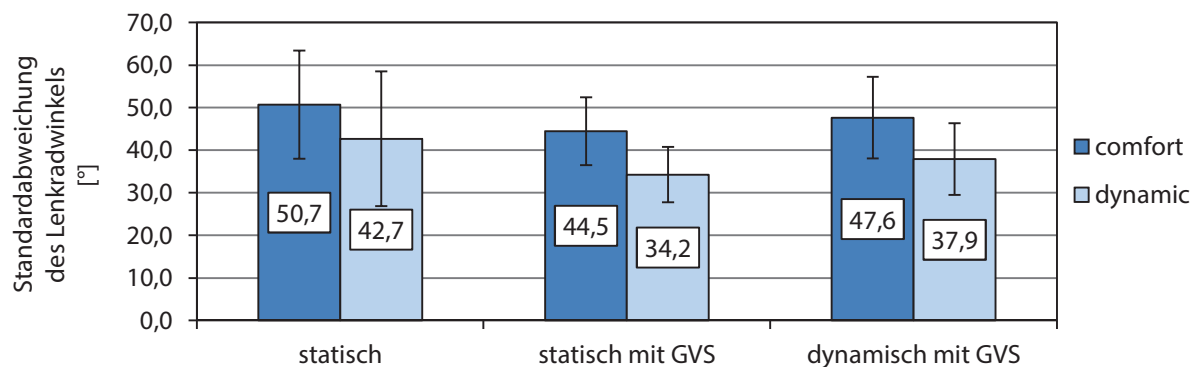


Abbildung 6-17: Standardabweichung des Lenkradwinkels, n = 15



Die **Maximalwerte des Lenkradwinkels** lassen ein identisches Bild erkennen. Die höchsten Lenkeinschläge sind im rein statischen Simulator ersichtlich, im Fall des dynamischen Simulators mit GVS-System ist ein Rückgang um rund 15° festzustellen. Im statischen Simulator mit GVS-System werden nochmals deutlich niedrigere Werte gemessen.

Die Varianzanalyse bestätigt einen signifikanten Effekt des Faktors Simulatorkonfiguration, $F(2; 28) = 6.58$; $p = .01$; $\eta_p^2 = .32$; $1-\beta = 1.0$. Die Post-Hoc-Tests weisen den Unterschied zwischen dem statischen Simulator und dem statischen Simulator mit GVS-System, $p = .02$, sowie zwischen den beiden Stufen mit GVS-System, $p = .02$, als signifikant aus. Auch die Wahl der Faktorstufen der Lenkungscharakteristik übt messbaren Einfluss auf den Kennwert aus, $F(1; 14) = 14.52$; $p = .002$; $\eta_p^2 = .51$; $1-\beta = 1.0$.

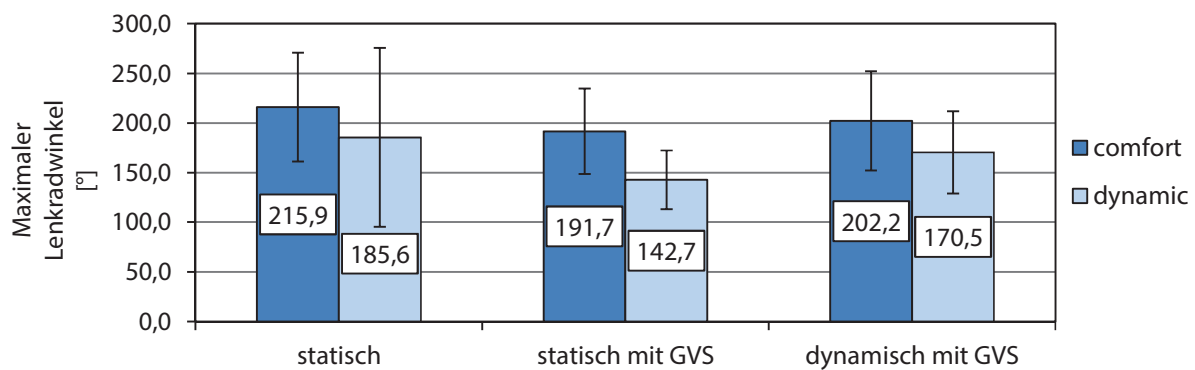


Abbildung 6-18: Maximaler Lenkradwinkel, n = 15

Große Differenzen zwischen der comfort- und dynamic-Lenkung werden auch bei der Berechnung des **Lenkfrequenzverhältnisses** festgestellt, $F(1; 14) = 33.29$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .70$; $1-\beta = 1.0$. Beim Vergleich der drei Faktorstufen der Simulatorkonfiguration ergeben sich zum wiederholten Mal beim statischen Simulator mit GVS-System die niedrigsten Werte.

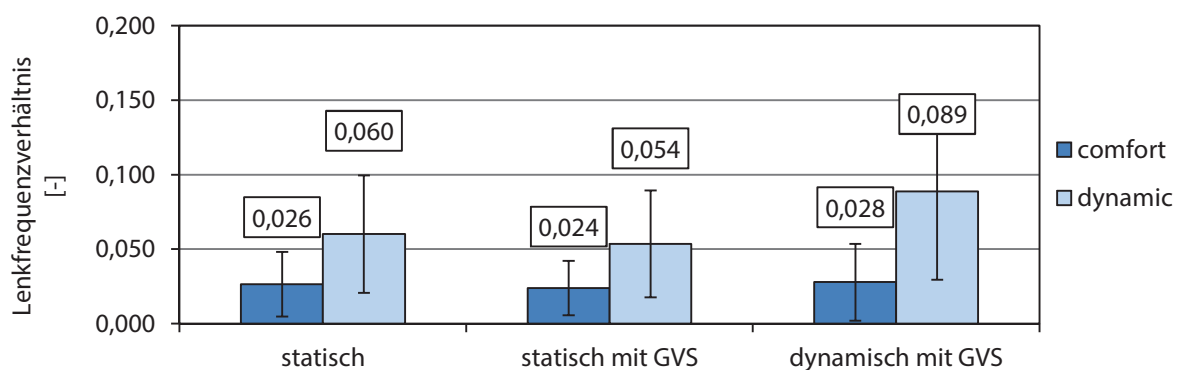


Abbildung 6-19: Lenkfrequenzverhältnis, n = 15



Im Vergleich dazu steigen beim rein statischen Simulator die Werte etwas an, die größten Werte werden beim dynamischen Simulator mit GVS-System ermittelt. Statistisch signifikante Abweichungen bestehen nicht, $F(2; 28) = 2.89$; $p = .07$; $\eta_p^2 = .17$; $1-\beta = .97$. Zusätzlich zu beachten sind die hohen Streuungen des Kennwerts.

Bei Einsatz der Bewegungsplattform mit GVS-System treten die höchsten Werte der **Lenkrückstellrate** auf. Die Steigerung im Vergleich zu den Varianten des statischen Simulators mit und ohne GVS-System ist allerdings nicht signifikant, $F(2; 28) = 2.56$; $p = .10$; $\eta_p^2 = .15$; $1-\beta = .98$. Dagegen sind die Abweichungen beim Faktor Lenkungscharakteristik als hochsignifikant verschieden anzusehen, $F(1; 14) = 60.70$; $p < .001$; $\eta_p^2 = .81$; $1-\beta = 1.0$.

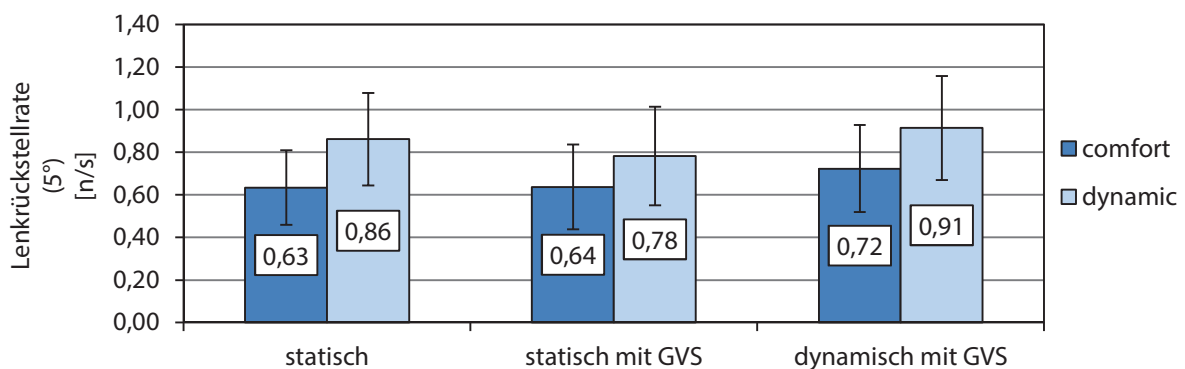


Abbildung 6-20: Lenkrückstellrate (5°), n = 15



6.5 Diskussion

Die Diskussion gliedert sich nach der Beantwortung der allgemeinen Fragestellungen zum GVS-System sowie der Analyse der subjektiven Bewertungen der Beurteilungsqualität und der objektiven Daten des Fahrerverhaltens.

6.5.1 Parametrierung, Verträglichkeit und Beschleunigungswahrnehmung

Wie angenommen wurde, ergeben sich hinsichtlich der verwendeten Stromstärke und damit der Parametrierung des GVS-Systems größere interindividuelle Unterschiede. Dennoch ist es einem Großteil der Probanden in Fahrer- wie auch Beifahrersituation möglich, einen realistischen Beschleunigungseindruck einer Kurvenfahrt zu gewinnen. Wie aus der subjektiven Befragung aber auch der Fahrt in Beifahrersituation abgeleitet werden kann, bestehen weitere Arbeitspunkte für eine Verbesserung des Systems in der Verminderung von Latenzzeiten zwischen dem Querbeschleunigungssignal der Fahrdynamikberechnung und der Wahrnehmung sowie Verarbeitung des Reizes. Hierzu muss zunächst eine geeignete Messmethode entworfen werden, die es dem Probanden ermöglicht, den Zeitpunkt und die Dauer der Beschleunigungsempfindung präzise zu kennzeichnen. Außerdem muss diese Erfassung zeitlich synchronisiert zur Aufzeichnung der Beschleunigungen im Fahrdynamikmodell des Simulators erfolgen. Ebenso sollte die Quantifizierung der Reizintensität in Abhängigkeit der auftretenden Querbeschleunigung präziser analysiert werden. Möglich wäre hierzu ein Szenario, bei dem geprüft wird, ob eine auf den Probanden wirkende, reale Beschleunigung bekannter Stärke durch das GVS-System kompensiert werden kann.

Von besonderer Bedeutung für den Einsatz einer neuen Simulationstechnologie ist die Verträglichkeit hinsichtlich Symptomen wie Schwindel, Desorientierung oder Übelkeit zu sehen. In Bezug auf die Ergebnisse des Simulator Sickness Questionnaire ist zu betonen, dass das Wohlbefinden der Probanden durch das GVS-System nicht beeinträchtigt wird. Unverträglichkeiten können auf Basis des geringen Probandenkollektivs allerdings nicht vollständig ausgeschlossen werden. Als Abschätzung aus dieser Studie ist aber nicht zu erwarten, dass eine Erhöhung im Vergleich zum alleinigen Einsatz eines Fahrsimulators auftritt.

Ein im Rahmen der Versuchsreihe kaum beachteter Aspekt ist die Herausforderung, das GVS-System als alltägliche Entwicklungsmethode zu etablieren. Die Vorbereitung des Systems, insbesondere die Anbringung der Elektroden und die Ermittlung der individuellen Parameter, benötigt verhältnismäßig hohen zeitlichen Aufwand. Weiterhin gestaltet sich auch das Herantasten an den Maximalwert der Stromstärke, welcher der Schmerzgrenze entspricht, als unangenehm für den Nutzer.



Im Vergleich dazu erfordert ein gewöhnlicher Fahrsimulator vom Probanden keine Tätigkeiten, die nicht auch im Realfahrzeug anfallen. In weiteren Studien ist deshalb insbesondere die Akzeptanz für den Einsatz der GVS-Technologie zu ermitteln.

6.5.2 Subjektive Bewertung

Wie bereits in der vorangegangenen Studie zum Einsatz der Bewegungsplattform des Fahrsimulators in Kapitel 5 können auch in der Studie zum GVS-System keine Auswirkungen auf die Differenzierungsfähigkeit oder Beurteilungssicherheit nachgewiesen werden. Als Konsequenz der mangelnden Teststärke wird verzichtet, die Hypothesen, vgl. Abbildung 6-21, zu interpretieren. Die Gültigkeit der Aussage kann somit nicht verallgemeinert werden. Da sich die Werte aller Versuchsbedingungen aber im Bereich der Fahrsimulatorstudie befinden, liegt zumindest der Schluss nahe, dass keine Beeinträchtigung der Entscheidungsfindung entsteht.

Bewertung der Hypothesen der GVS-Versuchsreihe Querdynamik Faktor Simulatorkonfiguration (Bewegungsplattform / GVS-System)			Bewertung
Beurteilungsqualität	H0	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems wirken sich nicht auf das Differenzieren der Lenkungscharakteristik aus.	
	H1	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems erhöhen die Differenzierungsfähigkeit.	
	H0	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems wirken sich nicht auf die Beurteilungssicherheit bei der Bewertung der Lenkungscharakteristik aus.	
	H1	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems erhöhen die Beurteilungssicherheit.	

Abbildung 6-21: GVS-Versuchsreihe Querdynamik: Bewertung der Hypothesen der subjektiven Daten, Faktor Simulatorkonfiguration

Insgesamt kann für die Differenzierung der Lenkungseinstellung geschlossen werden, dass das geänderte Fahrverhalten, das über vestibuläre Reize erfasst werden kann, nur eine untergeordnete Rolle spielt. Weder die Bewegungsplattform in Kapitel 5 noch das GVS-System in dieser Versuchsreihe führen als Technologien zur Beschleunigungsdarstellung zu einer nachweisbaren Abweichung im Bewertungsverhalten. Folgerichtig muss davon ausgegangen werden, dass die Differenzierung überwiegend mittels der propriozeptiven Wahrnehmung direkt an der Schnittstelle zwischen Fahrer und Lenkrad in diesem Teilregelkreis erfolgt. Dem gesamten Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis, mit dem Bewegungsverhalten des Fahrzeugs relativ zur Fahrbahn, kommt nur eine sekundäre Rolle zu.

6.5.3 Objektives Fahrerverhalten

In der GVS-Versuchsreihe werden keine Veränderungen auf Bahnführungsebene festgestellt, dies entspricht dem Ergebnis der Fahrsimulatorstudie aus Kapitel 5. Die zugehörige Nullhypothese, vgl. Abbildung 6-22 (oben), wird demnach akzeptiert, da auch die Teststärken überwiegend sehr hohe Werte aufweisen.

Auf Stabilisierungsebene ist ein geändertes Bild ersichtlich, das einer genaueren Interpretation bedarf. Wie aus der Fahrsimulatorstudie in Kapitel 5 bekannt ist, erhöht die Bewegungsplattform die Kennwerte bzw. verschiebt sie in Richtung eines unrealistischeren Fahrerverhaltens. Bei der Betrachtung des rein statischen Simulators als Ausgangspunkt lässt sich erkennen, dass die Hinzunahme des GVS-Systems einen gegenteiligen Effekt ermöglicht. Die Kennwerte verschieben sich in Richtung der Werte der Realfahrzeugstudie, vgl. Kapitel 4. Das GVS-System kann also zur Verbesserung des Fahrerverhaltens auf Stabilisierungsebene beitragen und den Realitätsgrad bzw. die Erlebbarkeit von Simulatorfahrten erhöhen. Somit wird die Nullhypothese zurückgewiesen, vgl. Abbildung 6-22 (unten), und die Alternativhypothese angenommen.

Bewertung der Hypothesen der GVS-Versuchsreihe Querdynamik			
Faktor Simulatorkonfiguration (Bewegungsplattform / GVS-System)			Bewertung
Fahrerverhalten	H0	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems haben keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Bahnführungsebene.	✓
	H1	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems verändern das Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene.	
	H0	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems haben keine Auswirkung auf das Fahrerverhalten auf einem Handlingkurs in Bezug auf die Stabilisierungsebene.	✗
	H1	Zusätzliche vestibuläre Reize des GVS-Systems verändern das Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene.	

Abbildung 6-22: GVS-Versuchsreihe Querdynamik: Bewertung der Hypothesen der objektiven Daten, Faktor Simulatorkonfiguration

Die Kombination aus dynamischem Simulator mit Bewegungsplattform und GVS-System kann als Mischung von positiven und negativen Einflüssen verstanden werden. Der positive Effekt des GVS-Systems wird durch die Bewegungsplattform revidiert. Folgerichtig befindet sich der Wertebereich der Kenngrößen zumeist im Bereich des rein statischen Simulators, teilweise auch darüber.

Insgesamt betrachtet bietet die GVS-Technologie für das getestete Fahrerverhalten auf Stabilisierungsebene ein Verbesserungspotential, vor allem bei der Lenkregeltätigkeit des Fahrers. Gerade für die Auslegung und Abstimmung querdynamischer Fahrzeugeigenschaften scheint das GVS-System deshalb besonders geeignet.



Wie in Kapitel 6.1.2 am Beispiel der Patentschrift von Cevette et al. (2011) erklärt, besteht bei komplexeren Anordnungen der Elektroden auch die Möglichkeit, weitere Beschleunigungsrichtungen zu simulieren. Denkbar wäre demnach auch ein Einsatz der Technologie zur Verbesserung des Bremsverhaltens. Dazu müsste eine Überlagerung der Längs- und Vertikalbeschleunigungen dargestellt werden, die der Verzögerung und Nickbewegung des Fahrzeugs entspricht.

Ob die Größenordnung und Realitätsnähe der erzeugten Reize bei weiterer Verfeinerung der Technologie ausreichend sind, um Abweichungen zum Fahrerverhalten im Realfahrzeug auf Bahnführungs- und Stabilisierungsebene gänzlich zu verhindern, bleibt zu klären.



Kapitel 7

Zusammenfassende Diskussion und Ausblick

Abschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit betrachtet, wobei nochmals auf die Validierung der Fahrsimulation anhand der Kennwerte des Fahrerverhaltens und der Beurteilungsqualität eingegangen wird. Der Ausblick widmet sich der Frage nach der Akzeptanz beim Einsatz der Fahrsimulation als Entwicklungsmethode im Bereich der Fahrdynamik.

7.1 Zusammenfassung der Probandenstudien

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, die Fahrsimulation für das Erleben und Beurteilen von Fahrverhalten zu validieren. Dazu werden die beiden Resultierenden von Fahr- und Beurteilungsaufgaben, das Fahrerverhalten bzw. die Beurteilungsqualität, geprüft. Im Bereich der subjektiven Daten des Beurteilens wird analysiert, inwieweit Fahrzeugeigenschaften richtig differenziert werden können. Insbesondere wird dazu auch die Qualität der Entscheidungsfindung hinterfragt. Das objektiv messbare Fahrerverhalten wird anhand verschiedener Kennwerte auf



Bahnführungs- sowie Stabilisierungsebene erfasst und der Vergleich zwischen Realfahrzeug und Simulator erarbeitet. Weiterhin beschäftigt sich die Arbeit mit der Ableitung von Verbesserungspotentialen bestehender Fahrsimulatoren und der Einführung neuartiger Simulationstechnologien.

Die ersten Studien im Realfahrzeug erzielen Aussagen zur Bedeutung der akustischen und visuellen Wahrnehmung im Bereich der Längs-, Quer- und Vertikaldynamik. Eine Einschränkung des horizontalen Sichtfeldes resultiert in einer Reduktion der Fahrgeschwindigkeit, während die Einschränkung des Hörvermögens die Fahrgeschwindigkeit steigert und ungleichmäßigeres querdynamisches Fahrerverhalten bewirkt. Die Differenzierungsleistung bei eingeschränkter Wahrnehmung bleibt erhalten, allerdings muss von Auswirkungen auf die Qualität der Entscheidungsfindung ausgegangen werden. Die weitaus größeren Abweichungen ergeben sich hinsichtlich der verschiedenen Wahrnehmungssysteme. Beispielsweise können die überwiegend vestibulär erfassbaren Veränderungen der Fahrwerkseinstellung kaum erkannt werden. Das Auflösungsvermögen des vestibulären Systems scheint für die Differenzierung des hier dargestellten Effekts im Fahrwerk als nicht ausreichend. Veränderungen der Lenkung, die neben der direkten Wahrnehmung über das somatosensorische System beispielsweise auch über eine visuelle Rückmeldung in Form des geänderten Bewegungsverhaltens des Fahrzeugs erfasst werden können, sind leichter zu differenzieren.

Die Versuchsreihen im Fahrsimulator übernehmen das Vorgehen zur Ermittlung der subjektiven und objektiven Daten. Zusätzlich erfolgt die Prüfung der Reliabilität von Simulatorfahrten, die weitgehend als erfüllt anzusehen ist. Speziell in der Versuchsreihe der Querdynamik, die umfassende Regeltätigkeiten des Fahrers erfordert, kann auf Basis der erhobenen Daten abgeleitet werden, dass keine Notwendigkeit eines zusätzlichen Trainings vorliegt. Die Durchführung von Eingewöhnungsfahrten in einem zum Realversuch vergleichbaren Umfang reicht demnach aus.

Zentraler Aspekt der Fahrsimulatorstudien ist die Bewertung einer Bewegungsplattform zur Steigerung der Erlebbarkeit mittels zusätzlicher, vestibulär erfassbarer Informationen. Die Beurteilungsqualität zeigt sich davon weitgehend unberührt und ist vergleichbar zu den Werten der Realfahrzeugstudie. Zum Fahrerverhalten auf Bahnführungsebene werden mit Ausnahme des Bremsverhaltens gleichermaßen realitätsnahe Kennwerte für die statische wie auch dynamische Simulatorkonfiguration ermittelt. Auf Stabilisierungsebene weichen die Kennwerte im statischen Simulator bereits stark von realem Lenkregelverhalten ab. Entgegen ihrem angedachten Zweck steigert die Bewegungsplattform diesen Effekt zusätzlich, erweist sich demnach also für die Erzeugung realitätsnahen Fahrerverhaltens im Bereich der Querdynamik als ungeeignet. Als Ursache kann die Beschränkung der Freiheitsgrade dieser Plattform auf eine Vertikal-, Nick- und Wankbewegung sowie der Verzicht auf eine Gierbewegung angeführt werden.



Diese Problembeschreibung wird in der dritten Probandenstudie aufgegriffen und mittels des Einsatzes von Galvanischer Vestibulärer Stimulation ein kostengünstiger Lösungsansatz aufgezeigt. Die direkte Beeinflussung des Gleichgewichtsorgans durch Aufprägung künstlicher Beschleunigungsreize erweist sich als zielführend zur Verbesserung der Lenkregeltätigkeit im Simulator. Gleichzeitig kann die Verträglichkeit des Systems ebenso wie eine unveränderte Beurteilungsqualität bestätigt werden. Arbeitspunkte sind die präzisere Anpassung der Intensität und insbesondere ein latenzzeitfreies Auftreten des Beschleunigungseindrucks. Weitere Schritte können die Umsetzung zusätzlicher Beschleunigungsrichtungen durch komplexere Anordnungen von Elektroden bilden. Zu bedenken ist auch der hohe Aufwand für die individuelle Anpassung bzw. Parametrierung des GVS-Systems in der hier eingesetzten Form. Vor einem weiterführenden Einsatz als dauerhaft genutztes Entwicklungswerkzeug müssen daher auch Fragen der Gebrauchstauglichkeit und Nutzerfreundlichkeit betrachtet werden.

7.2 Aussagekraft der Beurteilungsqualität und des Fahrerverhaltens

Über alle Versuchsreihen hinweg belegt die Analyse der Beurteilungsqualität vornehmlich generelle Unterschiede des Differenzierens und Beurteilens nach Art der Fahrzeugeigenschaft bzw. der Erfassung mittels des adäquaten Sinnessystems. Auswirkungen durch die Reduktion von Stimuli und eine veränderte Wahrnehmung können nur qualitativ aus der Analyse von Zusammenhängen abgeleitet werden, wie etwa falsche Differenzierungen bei gleichzeitig geringer Beurteilungssicherheit. Anhand absoluter Größen, wie der Differenzierungsfähigkeit, können keine Unterschiede nachgewiesen werden.

Außerdem muss festgehalten werden, dass die subjektiven Ergebnisse überwiegend geringe Teststärken aufweisen. Die zu beurteilenden Unterschiede befinden sich nahe am Bereich der menschlichen Wahrnehmungsschwellen, dies führt zu entsprechenden Streuungen der Ergebnisse und der in diesen Versuchsreihen unzureichenden Aussagekraft. Herauszustellen ist, dass die geringen Teststärken bei subjektiven Daten im Realfahrzeug wie auch im Fahrsimulator gleichermaßen auftreten, also keine alleinige Folge einer virtuellen Versuchsumgebung darstellen. Im Fall gleichzeitig geringer Effektstärken ist eine Steigerung der Probandenanzahl oder Verbesserung der Testmethodik nicht zielführend, da damit ausschließlich nach inferenzstatistischen Gesichtspunkten signifikante Ergebnisse erzielt werden können, die keinerlei praktische Relevanz besitzen. Da aber durchaus auch Effektgrößen mit realer Bedeutung auftreten, kann in diesen Fällen eine Vergrößerung des Probandenkollektivs in Erwägung gezogen werden, um ausreichend hohe Teststärken zu erreichen.



Durch das Zusammenfassen der Faktorstufen comfort und dynamic der Motor-, Lenkungs- oder Fahrwerkscharakteristik liegt bei den subjektiven Daten bereits eine Verdopplung des Stichprobenumfangs vor. Auf Basis dieser Versuchsdaten und des gewählten Versuchsdesigns lässt sich abschätzen, dass für ausreichende Teststärken eine weitere Erhöhung des Probandenkollektivs um das Zweifache notwendig wäre. Dem steht entgegen, dass der damit verbundene Bedarf an Zeit und Personal bei der Vielzahl fahrdynamischer Fragestellungen nicht realisierbar ist. Vielmehr treffen in der Praxis der Automobilentwicklung oftmals Kleingruppen oder Einzelpersonen Subjektiventscheidungen. Gerade deshalb muss neben der Betrachtung der Größenordnung zusätzlich auch eine andere Zusammensetzung des Probandenkollektivs genauer analysiert werden. Zu quantifizieren wäre beispielsweise, wie die Bewertungen von Fahrexper-ten und insbesondere die auftretenden Streuungen ausfallen. Möglicherweise genügen hier auch Kleingruppen, um statistisch aussagekräftige Beurteilungen von Fahrzeugeigenschaften durchführen zu können. Auch für eine Präzisierung der Fahraufgaben und der zu bewertenden Fahrzeugeigenschaften kann eine Versuchsdurchführung mit Fahrexper-ten anstelle technisch ver-sierter Normalfahrer empfehlenswert sein.

Die Abschätzung der Größe des Probandenkollektivs für die objektiven Daten des Fahrerverhaltens in den verschiedenen Versuchsreihen ist zutreffend und führt zu aussagekräftigen Ergebnissen. Insgesamt betrachtet wird für objektiv messbares Fahrerverhalten eine Abhängigkeit zum Grad der Erlebbarkeit in Form vorhandener Umgebungsreize aufgezeigt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass jede Reduktion der Stimuli und die veränderte Wahrnehmung des Fahrers in einem Fahrsimulator analysiert und quantifiziert werden muss. Wie am Beispiel der Bewegungsplattform nachgewiesen, führt eine technische Erweiterung nicht zwangsläufig zu realitätsnäherem Fahrerverhalten.

Außerdem muss beim Einsatz eines Fahrsimulators die Aufgabenstellung sehr präzise eingegrenzt und der Simulator für die jeweilige Ebene der Fahrzeugführung validiert worden sein. Dies bestätigen in dieser Arbeit die abweichenden Ergebnisse der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene. Auch innerhalb der jeweiligen Ebene kann nicht unbedingt von durchgängig validen Messwerten ausgegangen werden. Dies zeigt sich beispielsweise am unrealistischen Bremsverhalten bei gleichzeitig valider querdynamischer Bahnführung in den Versuchsreihen von Kapitel 5. Neben der Trennung nach Ebenen der Fahrzeugführung oder den Bewegungsrichtungen des Fahrzeugs kann für eine Validierung auch eine Gruppenbildung anhand der benötigten Sinnessysteme empfehlenswert sein.



7.3 Ausblick

Neben den direkten Ergebnissen unterstreichen die durchgeführten Studien dieser Arbeit auch allgemein, dass zur Verbesserung der Entwicklungsmethoden im Bereich der Fahrdynamik weiterer Forschungsbedarf besteht.

Unabhängig von einer realen oder virtuellen Versuchsumgebung müssen Beurteilungen fahrdynamischer Eigenschaften eines Fahrzeugs in hoher Qualität ermöglicht werden. Dazu sollte die Unschärfe von Subjektivbeurteilungen kritisch hinterfragt werden. Die Weiterentwicklung von Objektivierungsverfahren und deren Umsetzung in die industrielle Praxis sind hier als Handlungsfelder anzuführen.

Als generelle Herausforderung virtueller Entwicklung muss das Vertrauen der Nutzer in die Methode bzw. Technologie erreicht werden. Diese Akzeptanz bildet auch bei der Entwicklung fahrdynamischer Eigenschaften die Grundvoraussetzung, um Fahrsimulatoren als vollwertiges Entwicklungswerkzeug einsetzen zu können. Essentiell ist dafür das Erzielen eines zum Realfahrzeug vergleichbaren und damit validen Fahrerverhaltens mittels der realistischen Darstellung relevanter Umgebungsreize. So kann auch eine übertragbare Beurteilung fahrdynamischer Eigenschaften gewährleistet werden. Den Ressentiments gegenüber dem Einsatz der Fahrsimulation, welcher aus der Sicht der Kritiker eine Aufgabe der langjährig bewährten Entwicklung mit Versuchsfahrzeugen bedeutet, kann so bestmöglich begegnet werden. Da diese Vorbehalte oftmals weniger objektiv begründbar sind, ist gerade auch hier ein Vorteil der Fahrsimulation, einen subjektiv erlebbaren Gegenbeweis antreten zu können.

Wesentlich ist deshalb die kontinuierliche Weiterentwicklung der Methodik unter Hinzunahme technischer Innovationen. Gerade Technologien wie die Galvanische Vestibuläre Stimulation belegen, dass der stetige technische Fortschritt die in Teilbereichen noch bestehende Lücke zwischen Fahrsimulatoren und dem Realfahrzeug schließen kann. Damit können zukünftig reale Prototypen- und Versuchsfahrzeuge reduziert und eine durchgängige virtuelle Entwicklung von Fahrzeugeigenschaften aus dem Bereich der Fahrdynamik ermöglicht werden.

*Wenn ich die Menschen gefragt hätte,
was sie wollen, hätten sie gesagt:
schnellere Pferde.
Henry Ford*



Literaturverzeichnis

- Abendroth, B., Schreiber, M., Bruder, R., Maul, S. & Maul, D. (2012). Neue Ansätze zur Beurteilung der Fahrsimulatorvalidität. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 66 (1), 1–11.
- Allen, R. W., Rosenthal, T. J. & Cook, M. L. (2011). A Short History of Driving Simulation. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (S. 2.1-2.16). Hoboken: Taylor and Francis.
- Andersen, G. J. (2011). Sensory and Perceptual Factors in the Design of Driving Simulation Displays. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (S. 8.1-8.11). Hoboken: Taylor and Francis.
- Arioui, H., Hima, S., Nehaoua, L., Bertin, R. J. & Espie, S. (2011). From Design to Experiments of a 2 DOF Vehicle Driving Simulator. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60 (2), 357–368. Verfügbar unter DOI: 10.1109/TVT.2010.2090675
- Augusto, B. & Sandin, J. (2013). *MeMoS –Methods to improve and evaluate Motion Sensation in driving simulators*. 6th Human Centered Motion Cueing Workshop, Tübingen.
- Balk, S. A., Bertola, M. A. & Inman, V. W. (2013). Simulator Sickness Questionnaire: Twenty Years Later. In *Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design* (S. 257–263). Iowa City: University of Iowa.
- Beghi, A., Bruschetta, M., Maran, F. & Minen, D. (2012). A Model-based Motion Cueing strategy for compact driving simulation platforms. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (S. 137–147). Bron: INRETS.
- Bengler, K. (1995). *Gestaltung und experimentelle Untersuchung unterschiedlicher Präsentationsformen von Wegleitungsinformationen in Kraftfahrzeugen*. Regensburg: Roderer.
- Bengler, K., Bernasch, J. H. & Löwenau, J. P. (1997). Comparison of Eye Movement Behaviour During Negotiation of Curves on a Test Site and in a Driving Simulator. In K. A. Brookhuis, D. de Waard & C. M. Weikert (Hrsg.), *Simulators and Traffic Psychology. Proceedings of the 1996 annual meeting of the Europe Chapter of the Human Factors and Ergonomics Society*. Groningen: Centre for Environmental and Traffic Psychology – University of Groningen.
- Berberich, T., Gebhard, P., Bohlen, S., Danninger, O. & Lienkamp, M. (2013). A New Approach to the Presentation of Vibration Phenomena in Vehicles. In Society of Automotive Engineers of China (SAE-China) & International Federation of Automotive Engineering Societies (FISITA) (Hrsg.), *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Volume 13*:

- Noise, Vibration and Harshness (NVH)* (Lecture Notes in Electrical Engineering, Bd. 201, S. 591–598). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Berg, G. & Färber, B. (2015). Vehicle in the Loop. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Aufl., S. 155–163). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Bernotat, R. (1970). Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. *Ergonomics*, 13 (3), 353–377.
- Blümle, A. (2003). *Interaktion der visuellen, somatosensorischen und vestibulären Sinnessysteme bei der Gleichgewichtskontrolle*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.
- Bock, T. (2008). *Vehicle in the Loop. Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme*. Göttingen: Cuvillier.
- Boer, E. R., Jamson, A. H., Advani, S. K. & Horrobin, A. J. (2014). Are We There Yet? An Objective Mechanism to Support the Assessment of Driving Simulator Utility. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *New Developments in Driving Simulation Design and Experiments. Driving Simulation Conference Europe 2014 Proceedings* (S. 35.1-35.9).
- Bolling, A., Jansson, J. Genell, A., Hjort, M., Lidström, M., Nordmark, S., Palmkvist, G. et al. (2010). SHAKE – an approach for realistic simulation of rough roads in a moving base driving simulator. In A. Kemeny, F. Mérienne & S. Espié (Hrsg.), *Trends in Driving Simulation Design and Experiments. Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2010* (S. 135–143). Bron: INRETS.
- Bortz, J., Lienert, G. A., Barskova, T., Leitner, K. & Oesterreich, R. (2008). *Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung. Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben* (3. Aufl.). Heidelberg: Springer.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Braess, H.-H. & Donges, E. (2006). *Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - „Konsumierbare“ oder echte Verbesserungen?* 2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Garching.
- Breuer, J. (1874). Über die Funktion der Bogengänge des Ohrlabyrinths. *Medizinische Jahrbücher*, 4, 72–124.
- Bubb, H. (1977). Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 31, 103–112.



- Bubb, H. (1993). Systemergonomische Gestaltung. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Ergonomie* (3. Aufl., S. 390–420). München: Hanser.
- Bubb, H. (2001). Haptik im Kraftfahrzeug. In T. Jürgensohn & K.-P. Timpe (Hrsg.), *Kraftfahrzeugführung* (S. 155–175). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bubb, H. (2002). Umsetzung psychologischer Forschungsergebnisse in die ergonomische Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 48 (1), 8–15.
- Bühner, M. & Ziegler, M. (2009). *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. München: Pearson Education.
- Buschardt, B. (2003). *Synthetische Lenkmomente* (VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 22, Bd. 12). Dissertation Technische Universität Berlin. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Cevette, M., Stepanek, J. & Galea, A. (2011), United States Patent Application Publication US 2011/0029045 A1. USA.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2. Aufl.). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Colombet, F., Paillot, D., Mérienne, F. & Kemeny, A. (2010). Impact of Geometric Field Of View on Speed Perception. In A. Kemeny, F. Mérienne & S. Espié (Hrsg.), *Trends in Driving Simulation Design and Experiments. Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2010* (S. 69–79). Bron: INRETS.
- Curthoys, I. S. & MacDougall, H. G. (2012). What Galvanic Vestibular Stimulation Actually Activates. *Frontiers in Neurology*, 3, 1–5. Verfügbar unter doi: 10.3389/fneur.2012.00117
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F. & Kemeny, A. (2012). Toward predicting the subjective assessment of ESC in a driving simulator. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (S. 289–298). Bron: INRETS.
- DIN EN ISO 17287 (2003). *Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen. Verfahren zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit beim Führen eines Kraftfahrzeuges*. Berlin: Beuth.
- Donges, E. (1978). A Two-Level Model of Driver Steering Behavior. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 20 (6), 691–707.
- Donges, E. (1982). Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie* (27), 183–190.
- Donges, E. (2012). Fahrerhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive*

- Sicherheit und Komfort* (ATZ/MTZ-Fachbuch, 2., korrigierte Auflage, S. 15–23). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Ebel, B., Hofer, M. B. & Genster, B. (2014). Automotive Management – Herausforderungen für die Automobilindustrie. In B. Ebel & M. B. Hofer (Hrsg.), *Automotive Management. Strategie und Marketing in der Automobilwirtschaft* (S. 3–15). Berlin [u. a.]: Springer Gabler.
- Eckstein, L. (2001). *Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Ehlers, C. & Breitling, T. (2013). Fahrzeugkonzeption in der frühen Entwicklungsphase. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (ATZ/MTZ-Fachbuch, 7. Aufl., S. 1153–1158). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Eysel, U. (2010). Sehen und Augenbewegungen. In R. F. Schmidt, F. Lang & M. Heckmann (Hrsg.), *Physiologie des Menschen* (31. Aufl., S. 345–385). Heidelberg: Springer.
- Fang, Z. & Kemeny, A. (2012). Motion cueing algorithms for a real-time automobile driving simulator. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (S. 159–174). Bron: INRETS.
- Fang, Z., Kemeny, A., Guo, C. S., Deborne, R., Denoual, T. & Alirand, M. (2012). Electric vehicle's stability study on low friction road based on driving simulator. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (S. 335–346). Bron: INRETS.
- Fang, Z., Reymond, G. & Kemeny, A. (2010). Performance identification and compensation of simulator motion cueing delays. In A. Kemeny, F. Mérienne & S. Espié (Hrsg.), *Trends in Driving Simulation Design and Experiments. Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2010* (S. 111–120). Bron: INRETS.
- Field, A. (2013). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (4. Aufl.). Los Angeles [u. a.]: SAGE.
- Fischer, M. (2009). *Motion-Cueing-Algorithmen für eine realitätsnahe Bewegungssimulation* (Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, Bd. 5). Braunschweig: DLR.
- Fischer, M., Eriksson, L. & Oeltze, K. (2012). Evaluation of methods for measuring speed perception in a driving simulator. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (S. 71–93). Bron: INRETS.
- Fischer, M., Sehammer, H. & Palmkvist, G. (2010). Motion cueing for 3-, 6- and 8-degrees-of-freedom motion systems. In A. Kemeny, F. Mérienne & S. Espié (Hrsg.), *Trends in Driving*



- Simulation Design and Experiments. Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2010* (S. 121–134). Bron: INRETS.
- Fitzpatrick, R. C. & Day, B. L. (2004). Probing the human vestibular system with galvanic stimulation. *Journal of Applied Physiology*, 96, 2301–2316.
- Fritsche, O. (2013). *Physik für Biologen und Mediziner*. Berlin [u. a.]: Springer Spektrum.
- Funk, R. H. (2003). Sehorgan, Auge, Oculus et Structurae pertinentes. In J. Fanghänel, F. Pera, F. Anderhuber & R. Nitsch (Hrsg.), *A. Waldeyer - Anatomie des Menschen* (17. Aufl., S. 551–590). Berlin: de Gruyter.
- Geiser, G. (1985). Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. *ATZ - Automobil-technische Zeitschrift*, 87 (2), 77–84.
- Godley, S. T., Triggs, T. J. & Fildes, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident Analysis and Prevention*, 34, 589–600.
- Goldberg, J. M., Fernandez, C. & Smith, C. E. (1982). Responses of vestibular-nerve afferents in the squirrel monkey to externally applied galvanic currents. *Brain Research*, 252, 156–160.
- Goldstein, E. B. (2008). *Wahrnehmungspsychologie. Der Grundkurs*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Gough, V. E. & Whitehall, S. G. (1962). Universal Tyre Test Machine. In G. Eley (Hrsg.), *Ninth international automobile technical congress, 1962. Proceeding* (S. 117–137). London: Institution of Mechanical Engineers.
- Grabe, V., Pretto, P., Robuffo Giordano, P. & Bülthoff, H. H. (2010). Influence of Display Type on Drivers' Performance in a motion-based Driving Simulator. In A. Kemeny, F. Mérienne & S. Espié (Hrsg.), *Trends in Driving Simulation Design and Experiments. Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2010* (S. 81–88). Bron: INRETS.
- Graf, M. (2014). *Methode zur Erstellung und Absicherung einer modellbasierten Sollvorgabe für Fahrdynamikregelsysteme*. Dissertation, Technische Universität München.
- Granzow, S. (2012). Optimum Utilization of a Motion System by Offline Motion Cueing and its Applications. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (S. 381–382). Bron: INRETS.
- Gratzer, W. (2007). Informationsaufnahme beim Kraftfahrer. In H. Burg & A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion. Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation* (S. 193–208). Wiesbaden: Vieweg.

- Greenberg, J. & Blommer, M. (2011). Physical Fidelity of Driving Simulators. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (S. 7.1-7.24). Hoboken: Taylor and Francis.
- Groot, S. de, Winter, J. de, Mulder, M. & Wieringa, P. A. (2011). Nonvestibular Motion Cueing in a Fixed-Base Driving Simulator: Effects on Driver Braking and Cornering Performance. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 20 (2), 117–142.
- Hackenberg, U. & Heißing, B. (1982). Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 84 (7/8), 341–345.
- Handwerker, H. O. (2006a). Allgemeine Sinnesphysiologie. In R. F. Schmidt & H.-G. Schaible (Hrsg.), *Neuro- und Sinnesphysiologie* (Springer-Lehrbuch, 5. Aufl., S. 182–202). Heidelberg: Springer.
- Handwerker, H. O. (2006b). Somatosensorik. In R. F. Schmidt & H.-G. Schaible (Hrsg.), *Neuro- und Sinnesphysiologie* (Springer-Lehrbuch, 5. Aufl., S. 203–228). Heidelberg: Springer.
- Handwerker, H. O. & Schmelz, M. (2010). Allgemeine Sinnesphysiologie. In R. F. Schmidt, F. Lang & M. Heckmann (Hrsg.), *Physiologie des Menschen* (31. Aufl., S. 251–271). Heidelberg: Springer.
- Harting, J., Frey, A. & Jude, N. (2012). Validität. In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (2. Aufl., S. 143–171). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Heinecke, A. M. (2012). *Mensch-Computer-Interaktion. Basiswissen für Entwickler und Gestalter* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Heißing, B., Kudritzki, D., Schindlmaister, R. & Mauter, G. (2000). Menschgerechte Auslegung des dynamischen Verhaltens von Pkw. In H. Bubb (Hrsg.), *Ergonomie und Verkehrssicherheit. GfA Konferenzbeiträge der Herbstkonferenz 2000, 12. - 13. Oktober 2000 an der Technischen Universität München* (S. 1–31). München: Utz.
- Heißing, B. & Brandl, H. J. (2002). *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. Würzburg: Vogel.
- Heißing, B., Ersoy, M. & Gies, S. (2013a). Fahrdynamik. In B. Heißing, M. Ersoy & S. Gies (Hrsg.), *Fahrwerkhandbuch* (ATZ/MTZ-Fachbuch, 4. Aufl., S. 38–155). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Heißing, B., Ersoy, M. & Gies, S. (2013b). Fahrkomfort. In B. Heißing, M. Ersoy & S. Gies (Hrsg.), *Fahrwerkhandbuch* (ATZ/MTZ-Fachbuch, 4. Aufl., S. 475–503). Wiesbaden: Springer Fachmedien.



- Heller, O. (1982). Theorie und Praxis des Verfahrens der Kategorienunterteilung (KU). In Psychologisches Institut der Universität Würzburg (Hrsg.), *Forschungsbericht 1981* (S. 1–15).
- Hofinger, G. (2012). Fehler und Unfälle. In P. Badke-Schaub, G. Hofinger & K. Lauche (Hrsg.), *Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen* (S. 39–60). Heidelberg: Springer.
- Holm, S. (1979). A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6 (2), 65–70.
- Jamson, A. H. (2011). Cross-Platform Validation Issues. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (S. 12.1–12.13). Hoboken: Taylor and Francis.
- Jamson, A. H. (2012). An optimisation of classical motion cueing in the University of Leeds Driving Simulator. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (S. 183–204). Bron: INRETS.
- Kemeny, A. & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7 (1), 31–37.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S. & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3 (3), 203–220.
- Kingdom, F. A. A. & Prins, N. (2010). *Psychophysics*. London [u. a.]: Elsevier, Academic Press.
- Kingma, H. (2005). Thresholds for perception of direction of linear acceleration as a possible evaluation of the otolith function. *BMC ear, nose, and throat disorders*, 5 (1), 5.
- Knappe, G., Keinath, A., Bengler, K. & Meinecke, C. (2007). Driving simulator as an evaluation tool – assessment of field of view and secondary tasks on lane keeping and steering performance. In *Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)* (Paper Number 07-0262). Zugriff am 06.10.2014. Verfügbar unter <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv20/07-0262-O.pdf>
- Knappe, G. (2009). *Empirische Untersuchungen zur Querregelung in Fahrsimulatoren. Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen und Sensitivität von Messgrößen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Koschnick, W. J. (1995). *Management: Enzyklopädisches Lexikon*. Berlin, New York: de Gruyter.

- Kraft, C. (2011). *Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich* (Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Bd. 5). Karlsruhe: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik.
- Krüger, H.-P., Neukum, A. & Schuller, J. (1999). Bewertung von Fahrzeugeigenschaften - vom Fahrgefühl zum Fahrergefühl. In *Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen - 3. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 22). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Lange, A., Maas, M., Albert, M., Siedersberger, K.-H. & Bengler, K. (2014). Automatisiertes Fahren - So komfortabel wie möglich, so dynamisch wie nötig. In *30. VDI-VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit* (VDI-Berichte, Bd. 2223). Düsseldorf: VDI.
- Lange, C. (2008). *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*. Dissertation, Technische Universität München.
- Link, E. (1931), US 1825462 A. USA.
- Ludewig, T. (2012). Intelligente Sitzsteuerung zur Anpassung an den Strassenverlauf. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (10/2012), 790–794.
- Mark, H. (1985), United States Patent 4558703. USA.
- McNally, P. J. (2014). Driver Control and Trajectory Optimization Applied to Lane Change Maneuver. In H. Waschl, I. Kolmanovsky, M. Steinbuch & L. del Re (Hrsg.), *Optimization and Optimal Control in Automotive Systems* (Lecture Notes in Control and Information Sciences, Bd. 455, S. 93–107). Cham [u. a.]: Springer.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In L. Evans & R. C. Schwing (Hrsg.), *Human behavior and traffic safety* (S. 485–520). New York: Plenum Press.
- Möllmann, J. (2011). *Fahrsimulator als Versuchsträger für PKW-Antriebe* (Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, Bd. 26). Dissertation, TU Braunschweig. Aachen: Shaker.
- Moore, S. T., Dilda, V. & MacDougall, H. (2011). Galvanic Vestibular Stimulation as an Analogue of Spatial Disorientation After Spaceflight. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 82, 535–542.
- 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. Caird & J. D. Lee



- (Hrsg.), *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (S. 13.1-13.18). Hoboken: Taylor and Francis.
- Müller, T., Hajek, H., Radic-Weissenfeld, L. & Bengler, K. (2013). Can You Feel The Difference? The Just Noticeable Difference of Longitudinal Acceleration. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57 (1), 1219–1223.
- Negele, H.-J. (2007). *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahr simulatoren für die Fahrzeugentwicklung*. Dissertation, Technische Universität München.
- Nesti, A., Masone, C., Barnett-Cowan, M., Robuffo Giordano, P., Bülthoff, H. H. & Pretto, P. (2012). Roll rate thresholds and perceived realism in driving simulation. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (S. 23–32). Bron: INRETS.
- Neukum, A., Krüger, H.-P. & Schuller, J. (2001). Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? In VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (VDI-Berichte, Nr. 1613, S. 13–32). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Östlund, J., Nilsson, L., Carsten, O., Merat, N., Jamson, H., Jamson, S. et al. (2004) HASTE Deliverable 2 - HMI and Safety-Related Driver Performance. In Institute for Transport Studies, University of Leeds (Hrsg.), *Human Machine Interface And the Safety of Traffic in Europe (HASTE)* (Project GRD1/2000/25361 S12.319626). Verfügbar unter <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/haste/Haste%20D2%20v1-3%20small.pdf>
- Pereira, T. V., Patsopoulos, N. A., Salanti, G. & Ioannidis, J. (2010). Critical interpretation of Cochran's Q test depends on power and prior assumptions about heterogeneity. *Research Synthesis Methods*, 1 (2), 149–161.
- Pfeffer, P. & Harrer, M. (2011). *Lenkungs handbuch*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Ranney, T. A. (2011). Psychological Fidelity: Perception of Risk. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology* (S. 9.1-9.13). Hoboken: Taylor and Francis.
- Rasch, B., Frieze, M., Hofmann, W. & Naumann, E. (2010). *Quantitative Methoden Band 2. Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler* (3. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13 (3), 257–266.

- Reed-Jones, R. J., Reed-Jones, J. G., Trick, L. M. & Vallis, L. A. (2007). Can Galvanic Vestibular Stimulation Reduce Simulator Adaption Syndrome? In University of Iowa, Public Policy Center (Hrsg.), *Proceedings of the 4th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design: Driving assessment 2007* (S. 534–540). Iowa City.
- Rockwell, T. H. (1971). Eye movement analysis of visual information acquisition in driving: an overview. In P. F. Waller (Hrsg.), *Mushrooming Technology: New Directions in Highway Safety* (North Carolina Symposium on Highway Safety, Bd. 4, S. 67–85). Chapel Hill: The University of North Carolina Highway Safety Research Center.
- Rohrmann, B. (1978). Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung. *Zeitschrift für Sozialpsychologie*, 9, 222–245.
- Schimmel, C. (2010). *Entwicklung eines fahrerbasierten Werkzeugs zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke*. Dissertation, Technische Universität München.
- Schindler, E. (2007). *Fahrdynamik. Grundlagen des Lenkverhaltens und ihre Anwendung für Fahrzeugregelsysteme* (Kontakt & Studium, Bd. 685). Renningen: Expert-Verlag.
- Scholz, S. (2003). *Güte der visuellen und auditiven Geschwindigkeitsdiskriminierung in einer virtuellen Simulationsumgebung*. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: is it indeed 90% visual? *Perception*, 25 (9), 1081–1089.
- Skoda, S., Steffens, J. & Becker-Schweitzer, J. (2012). Multisensory interaction – A comparative study on driving sound evaluation in moving base and fixed base driving simulators. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012*. Bron: INRETS.
- Stephan, T., Deutschländer, A., Nolte, A., Schneider, E., Wiesmann, M., Brandt, T. et al. (2005). Functional MRI of galvanic vestibular stimulation with alternating currents at different frequencies. *NeuroImage*, 26 (3), 721–732. Verfügbar unter DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.02.049
- Stewart, D. (1966). A platform with six degrees of freedom. *Institution of Mechanical Engineers Proceedings*, 180 (Part 1, No.15), 371–386.
- Stickel, T. (2006). Einfluss von Karosseriesteifigkeiten auf die Fahreigenschaften eines PKW. In K. Becker (Hrsg.), *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen III. Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und -komponenten* (Haus der Technik Fachbuch, Bd. 56, S. 84–107). Renningen: expert.



- Stratulat, A. M., Diaz, E., Vars, P., Masfrand, S., Leblond, L., Gruel, G. et al. (2014). Real vs Virtual Driving or How to Improve the Realism of a Dynamic Driving Simulator. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *New Developments in Driving Simulation Design and Experiments. Driving Simulation Conference Europe 2014 Proceedings* (S. 28.1-28.7).
- Stratulat, A. M., Roussarie, V., Vercher, J.-L. & Bourdin, C. (2012). Perception of longitudinal acceleration on dynamic driving simulator. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (S. 33–40). Bron: INRETS.
- Tomaske, W. (1983). *Einfluß der Bewegungsinformation auf das Lenkregelverhalten des Fahrers sowie Folgerungen für die Auslegung von Fahrsimulatoren*. Dissertation, Hochschule der Bundeswehr 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* (Haus der Technik Fachbuch, Bd. 56, S. 1–16). Renningen: expert.
- Treede, R.-D. (2010). Das somatosensorische System. In R. F. Schmidt, F. Lang & M. Heckmann (Hrsg.), *Physiologie des Menschen* (31. Aufl., S. 272–297). Heidelberg: Springer.
- Van der Borch, P., Hoffmeyer, F. & Thalen, B. (2012). Performance optimization of a hexapod on a lateral rail with force feed forward compensation. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012* (S. 175–182). Bron: INRETS.
- Vollrath, M. & Rataj, J. (2006). What is difficult at intersections? Virtual and real driving. In ERTICO (Hrsg.), *ITS World Conference 2006. 13th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. London, 08.-12.10.2006.
- Vollrath, M. (2015). Statistische Methoden. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (S. 663–684). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Warren, W. H. (1995). Self-Motion: Visual Perception and Visual Control. In W. Epstein & S. Rogers (Hrsg.), *Perception of Space and Motion* (S. 263–325). San Diego: Academic Press.
- Weber, F. (2011). *System Identification of Optic-Flow Processing Neurons in the Fly: Single Cell and Small Circuit Models*. Dissertation, Graduate School of Systemic Neurosciences, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Wetherill, G. B. & Levitt, H. (1965). Sequential Estimation of Points on a Psychometric Function. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 18 (1), 1–10.

- Widmann, U. (2013). Berechnung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (ATZ/MTZ-Fachbuch, 7. Aufl., S. 1159–1182). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Widmann, U. & Hackenberg, U. (2013). Simultaneous Engineering und Projektmanagement im Produktentstehungsprozess. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (ATZ/MTZ-Fachbuch, 7. Aufl., S. 1134–1152). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Wiedemann, M., Remlinger, W. & Bengler, K. (2014a). Application of Galvanic Vestibular Stimulation for the Evaluation of Vehicle Settings in a Fixed-Base Simulator. In N. Stanton, S. Landry, G. Di Bucchianico & A. Vallicelli (Hrsg.), *Advances in Human Aspects of Transportation: Part II* (S. 21–28). AHFE Conference 2014.
- Wiedemann, M., Remlinger, W. & Bengler, K. (2014b). Erlebbarkeit und Entscheidbarkeit von Fahrzeugeigenschaften im Realfahrzeug und Simulator. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.), *Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft. Bericht zum 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 12.-14. März 2014* (S. 384–386). Dortmund: GfA-Press.
- Wolf, H. J. (2009). *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen*. Dissertation, Technische Universität München.
- Zenner, H.-P. (2006). Hören. In R. F. Schmidt & H.-G. Schaible (Hrsg.), *Neuro- und Sinnesphysiologie* (Springer-Lehrbuch, 5. Aufl., S. 287–311). Heidelberg: Springer.
- Zenner, H.-P. (2010a). Der Gleichgewichtssinn und die Bewegungs- und Lageempfindung des Menschen. In R. F. Schmidt, F. Lang & M. Heckmann (Hrsg.), *Physiologie des Menschen* (31. Aufl., S. 336–344). Heidelberg: Springer.
- Zenner, H.-P. (2010b). Die Kommunikation des Menschen: Hören und Sprechen. In R. F. Schmidt, F. Lang & M. Heckmann (Hrsg.), *Physiologie des Menschen* (31. Aufl., S. 315–335). Heidelberg: Springer.
- Zöllner, I. M. (2015). *Analyse des Einflusses ausgewählter Gestaltungsparameter einer Fahr-simulation auf die Fahrerverhaltensvalidität*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.



Studienarbeiten

Die folgenden nichtveröffentlichten Studienarbeiten wurden unter Anleitung des Autors der vorliegenden Arbeit erstellt. Auf Anfrage sind diese bei der Fachinformation der AUDI AG, 85045 Ingolstadt, erhältlich.

Ceh, S. (2013). *Analyse von Wahrnehmungsprozessen beim Führen eines Fahrzeugs*. Nichtveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität München.

Mennig, I. M. (2014). *Eignung eines Fahrsimulators mit Bewegungsplattform für die Erlebbarkeit von Fahrdynamik*. Nichtveröffentlichte Masterarbeit, Technische Universität Chemnitz.



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Erlebbarkeit und Prüfbarkeit in der virtuellen und realfahrzeugbasierten Fahrdynamikentwicklung	3
Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau von Kapitel 2 anhand des Mensch-Maschine-Regelkreises nach Bernotat (1970) bzw. Bubb (1993)	8
Abbildung 2-2: Der Regelkreis von Fahrer und Fahrzeug nach Bubb (1993) bzw. Bernotat (1970)	9
Abbildung 2-3: Zeitverlauf der Ebenen der primären Fahraufgabe nach Braess und Donges (2006)	10
Abbildung 2-4: Verknüpfung des Modells der Handlungsregulation mit dem Drei-Ebenen-Modell der primären Fahraufgabe (Donges, 2012)	11
Abbildung 2-5: Der Regelkreis von Fahrer, Fahrzeug und Umwelt nach Bubb (2001)	12
Abbildung 2-6: Der Wahrnehmungsprozess nach Goldstein (2008). Die blauen Pfeile zeigen Reize, die grünen Verarbeitungsprozesse, die orangefarbenen perzeptuelle Antworten	13
Abbildung 2-7: Schnittdarstellung des Auges mit Illustrierung eines Sichtwinkels α von 1° (Eysel, 2010)	15
Abbildung 2-8: Illustration des optischen Flusses mittels zugehöriger Geschwindigkeitsvektoren (Weber, 2011)	17
Abbildung 2-9: Aufbau des Ohrs (Zenner, 2010b)	18
Abbildung 2-10: Funktionsprinzip eines Bogengangs (Fritsche, 2013)	19
Abbildung 2-11: Schematische Struktur der Hard- und Softwarekomponenten eines Fahrsimulators und deren Interaktion mit dem Fahrer nach Augusto und Sandin (2013)	26
Abbildung 2-12: Fahrsimulator mit Hexapod als typisches Beispiel einer Bewegungsplattform mit sechs Freiheitsgraden (Quelle: AUDI AG)	33
Abbildung 2-13: Translation: Entsprechend dem Realfahrzeug tritt eine resultierende Kraft in Folge der Längsbeschleunigung auf. Rotation: Anteil der Gewichtskraft wird als Längsbeschleunigung wahrgenommen	34
Abbildung 2-14: Möglichkeiten der objektiven und subjektiven Entscheidungsfindung zur Entwicklung von Fahrdynamikeigenschaften	38

Abbildung 2-15: Bewertungsschema zur Subjektivbeurteilung nach Heißing und Brandl (2002).....	40
Abbildung 3-1: Schematisches Vorgehen zur Prüfung der Erlebbarkeit in Fahrsimulatoren. Bei Fahr- und Beurteilungsaufgaben wird das Fahrerverhalten bzw. die Beurteilungsqualität validiert. Die dazu erhobenen Kennwerte werden in Kapitel 3.4 beschrieben.....	46
Abbildung 3-2: Schematisches Vorgehen im Rahmen der Arbeit.....	50
Abbildung 3-3: (v. l. n. r.) Zeitlicher Verlauf des Lenkradwinkels, Lenkradwinkel über der Frequenz, Leistungsdichtespektrum über der Frequenz und logarithmiertes Leistungsdichtespektrum über der Frequenz eines exemplarischen Datensatzes. Veranschaulicht (in rot) sind die Lenkrückstellungen größer 5° (l. o.) und die Flächenanteile des Lenkfrequenzverhältnisses (r. u.).	54
Abbildung 4-1: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Längsdynamik.....	61
Abbildung 4-2: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik - Teil 1 - Faktor akustische Einschränkung	63
Abbildung 4-3: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik - Teil 2 - Faktor visuelle Einschränkung	64
Abbildung 4-4: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Vertikaldynamik.....	65
Abbildung 4-5: Das System Audi drive select zur Variation der Charakteristik von Motor und Getriebe, Lenkung und Fahrwerk.....	67
Abbildung 4-6: Einschränkung des horizontalen Sichtfeldes; o. l. erste Stufe, ca. 100°; u. l. zweite Stufe, ca. 35°	68
Abbildung 4-7: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Motorcharakteristik bei akustischer Einschränkung (Gesamt: n = 48), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung.....	72
Abbildung 4-8: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Lenkungscharakteristik bei visueller Einschränkung (Gesamt: n = 46), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung.....	73
Abbildung 4-9: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Lenkungscharakteristik bei akustischer Einschränkung (Gesamt: n = 46), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung.....	74



Abbildung 4-10: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit der Referenzfahrten aller 24 Probanden – Stufen comfort und dynamic des Faktors Lenkungscharakteristik.....	75
Abbildung 4-11: Darstellung der Längsbeschleunigung über der Querb beschleunigung bei drei exemplarischen Referenzfahrten verschiedener Probanden	76
Abbildung 4-12: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei akust. Einschränkung, n = 24.....	76
Abbildung 4-13: Minimum der Längsbeschleunigung bei akust. Einschränkung, n = 24	77
Abbildung 4-14: Durchschnittliche Querb beschleunigung bei akust. Einschränkung, n = 24.....	77
Abbildung 4-15: Maximale Querb beschleunigung bei akust. Einschränkung, n = 24.....	78
Abbildung 4-16: Durchschnittliche Giergeschwindigkeit bei akust. Einschränkung, n = 24.....	78
Abbildung 4-17: Durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei akust. Einschränkung, n = 24	79
Abbildung 4-18: Standardabweichung des Lenkradwinkels bei akust. Einschränkung, n = 24.....	79
Abbildung 4-19: Maximaler Lenkradwinkel bei akust. Einschränkung, n = 24.....	80
Abbildung 4-20: Lenkfrequenzverhältnis bei akust. Einschränkung, n = 24	80
Abbildung 4-21: Lenkrückstellrate (5°) bei akust. Einschränkung, n = 24.....	81
Abbildung 4-22: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei visueller Einschränkung, n = 24.....	81
Abbildung 4-23: Minimum der Längsbeschleunigung bei visueller Einschränkung, n = 24.....	82
Abbildung 4-24: Durchschnittliche Querb beschleunigung bei visueller Einschränkung, n = 24.....	82
Abbildung 4-25: Maximale Querb beschleunigung bei visueller Einschränkung, n = 24.....	83
Abbildung 4-26: Durchschnittliche Giergeschwindigkeit bei visueller Einschränkung, n = 24.....	83
Abbildung 4-27: Durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit bei visueller Einschränkung, n = 24	84

Abbildung 4-28: Standardabweichung des Lenkradwinkels bei visueller Einschränkung, n = 24.....	85
Abbildung 4-29: Maximaler Lenkradwinkel bei visueller Einschränkung, n = 24	85
Abbildung 4-30: Lenkfrequenzverhältnis bei visueller Einschränkung, n = 24	86
Abbildung 4-31: Lenkrückstellrate (5°) bei visueller Einschränkung, n = 24.....	86
Abbildung 4-32: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Fahrwerkscharakteristik bei akustischer Einschränkung (Gesamt: n = 48), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung.....	87
Abbildung 4-33: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei akust. Einschränkung, n = 24.....	88
Abbildung 4-34: Symbolik zur Bewertung der Versuchshypothesen	89
Abbildung 4-35: Versuchsreihe Längsdynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten	89
Abbildung 4-36: Versuchsreihe Querdynamik, Versuchsteil 1 (akustische Einschränkung): Bewertung der Hypothesen der subjektiven Daten	90
Abbildung 4-37: Versuchsreihe Querdynamik, Versuchsteil 2 (visuelle Einschränkung): Bewertung der Hypothesen der subjektiven Daten	90
Abbildung 4-38: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten	91
Abbildung 4-39: Versuchsreihe Querdynamik, Versuchsteil 1 (akustische Einschränkung): Bewertung der Hypothesen der objektiven Daten	92
Abbildung 4-40: Versuchsreihe Querdynamik, Versuchsteil 2 (visuelle Einschränkung): Bewertung der Hypothesen der objektiven Daten.....	92
Abbildung 4-41: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der obj. Daten	93
Abbildung 5-1: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Längsdynamik – Faktor Simulatorkonfiguration	99
Abbildung 5-2: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Längsdynamik – Faktor Fahrtwiederholung.....	99
Abbildung 5-3: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik – Faktor Simulatorkonfiguration.....	101



Abbildung 5-4: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Querdynamik – Faktor Fahrtwiederholung.....	101
Abbildung 5-5: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Vertikaldynamik – Faktor Simulatorkonfiguration.....	103
Abbildung 5-6: Hypothesen und erhobene Kennwerte der Versuchsreihe Vertikaldynamik – Faktor Fahrtwiederholung.....	103
Abbildung 5-7: Außenansicht und Fahrersicht des eingesetzten Fahrsimulators.....	105
Abbildung 5-8: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Motorcharakteristik (Gesamt: n = 56), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung.....	110
Abbildung 5-9: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Lenkungscharakteristik (Gesamt: n = 56), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung.....	111
Abbildung 5-10: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, n = 28	112
Abbildung 5-11: Minimum der Längsbeschleunigung, n = 28	112
Abbildung 5-12: Durchschnittliche Querb beschleunigung, n = 28	113
Abbildung 5-13: Maximale Querb beschleunigung, n = 28.....	113
Abbildung 5-14: Durchschnittliche Giergeschwindigkeit, n = 28.....	114
Abbildung 5-15: Durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit, n = 28	114
Abbildung 5-16: Standardabweichung des Lenkradwinkels, n = 28.....	115
Abbildung 5-17: Maximaler Lenkradwinkel, n = 28	115
Abbildung 5-18: Lenkfrequenzverhältnis, n = 28	116
Abbildung 5-19: Lenkrückstellrate (5°), n = 28.....	116
Abbildung 5-20: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Fahrwerkscharakteristik (Gesamt: n = 56), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung.....	118
Abbildung 5-21: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, n = 28	118
Abbildung 5-22: Durchschnittliche Vertikalbeschleunigung, n = 28	119
Abbildung 5-23: Maximale Vertikalbeschleunigung, n = 28.....	119

Abbildung 5-24: Versuchsreihe Längsdynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Simulatorkonfiguration	120
Abbildung 5-25: Versuchsreihe Längsdynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Fahrtwiederholung.....	121
Abbildung 5-26: Versuchsreihe Querdynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Simulatorkonfiguration	121
Abbildung 5-27: Versuchsreihe Querdynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Fahrtwiederholung.....	122
Abbildung 5-28: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Simulatorkonfiguration	122
Abbildung 5-29: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der subj. Daten, Faktor Fahrtwiederholung.....	123
Abbildung 5-30: Versuchsreihe Querdynamik: Bewertung der Hypothesen der obj. Daten, Faktor Simulatorkonfiguration	124
Abbildung 5-31: Versuchsreihe Querdynamik: Bewertung der Hypothesen der obj. Daten, Faktor Fahrtwiederholung.....	124
Abbildung 5-32: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der obj. Daten, Faktor Simulatorkonfiguration	125
Abbildung 5-33: Versuchsreihe Vertikaldynamik: Bewertung der Hypothesen der obj. Daten, Faktor Fahrtwiederholung.....	125
Abbildung 5-34: Exemplarischer Vergleich der Lenkbewegungen zwischen Realfahrzeug und Fahrsimulator in der Versuchsreihe der Querdynamik.....	127
Abbildung 6-1: Vektorielle Betrachtung der neuronalen Impulse der einzelnen Bogengänge; gezeigt sind die Beschleunigungsvektoren des anterioren (a), posterioren (p) und horizontalen Bogengangs (h), der resultierende Vektor der linken bzw. rechten Seite (r) sowie die Vektorsumme der linken und rechten Kopfseite (L+R) mit den Wank- (R) und Gieranteilen (Y) (Fitzpatrick & Day, 2004).	130
Abbildung 6-2: Schematischer Ablauf der GVS-Studie.....	132
Abbildung 6-3: Thesen und zugehörige Kennwerte zur Parametrierung und Verträglichkeit des GVS-Systems.....	133
Abbildung 6-4: Thesen und zugehörige Kennwerte zur Beschleunigungswahrnehmung mittels des GVS-Systems.....	134



Abbildung 6-5: Hypothesen und erhobene Kennwerte der GVS-Versuchsreihe Querndynamik – Faktor Simulatorkonfiguration.....	135
Abbildung 6-6: GVS-System bestehend aus der Sendeeinheit, der Empfangseinheit mit Batterie und Drehpotentiometer sowie dem Kopfhörer mit Klebeelektroden.....	136
Abbildung 6-7: Maximal- und Minimalwert der eingesetzten Stromstärke, n = 15.....	139
Abbildung 6-8: Bewertungen des Simulator Sickness Questionnaire (Darstellung mit reduzierter Skala 0 bis 0,6 Punkte, theoretisch möglicher Wertebereich 0 bis 3 Punkte), n = 15.....	140
Abbildung 6-9: Subjektive Bewertung der Richtung, der Intensität und des Zeitpunkts der Beschleunigungsempfindung bei Nutzung des GVS-Systems, n = 15.....	141
Abbildung 6-10: Beurteilungssicherheit für die Differenzierung der Lenkungscharakteristik (Gesamt: n = 30), zusätzliche Darstellung der Beurteilungssicherheit bei richtiger und falscher Differenzierung.....	142
Abbildung 6-11: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, n = 15	142
Abbildung 6-12: Minimum der Längsbeschleunigung, n = 15	143
Abbildung 6-13: Durchschnittliche Querbewegung, n = 15.....	143
Abbildung 6-14: Maximale Querbewegung, n = 15.....	144
Abbildung 6-15: Durchschnittliche Giergeschwindigkeit, n = 15.....	144
Abbildung 6-16: Durchschnittliche Lenkradwinkelgeschwindigkeit, n = 15	145
Abbildung 6-17: Standardabweichung des Lenkradwinkels, n = 15.....	145
Abbildung 6-18: Maximaler Lenkradwinkel, n = 15	146
Abbildung 6-19: Lenkfrequenzverhältnis, n = 15	146
Abbildung 6-20: Lenkrückstellrate (5°), n = 15.....	147
Abbildung 6-21: GVS-Versuchsreihe Querndynamik: Bewertung der Hypothesen der subjektiven Daten, Faktor Simulatorkonfiguration	149
Abbildung 6-22: GVS-Versuchsreihe Querndynamik: Bewertung der Hypothesen der objektiven Daten, Faktor Simulatorkonfiguration.....	150



Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Wahrnehmungsschwellen für translatorische und rotatorische Beschleunigungen nach Heißing et al. (2000).....	20
Tabelle 2-2: Zuordnung fahrdynamischer Größen zu den adäquaten Sinnessystemen	22
Tabelle 4-1: Versuchsfaktoren der Versuchsreihe Längsdynamik.....	61
Tabelle 4-2: Faktoren des ersten Versuchsteils zur Querdynamik	62
Tabelle 4-3: Faktoren des zweiten Versuchsteils zur Querdynamik.....	63
Tabelle 4-4: Versuchsfaktoren der Versuchsreihe Vertikaldynamik	65
Tabelle 4-5: Probandenkollektiv der Versuchsreihen im Realfahrzeug (n=24).....	70
Tabelle 4-6: Differenzierungsfähigkeit Motorcharakteristik, akust. Einschränkung, n = 48	71
Tabelle 4-7: Differenzierungsfähigkeit Lenkungscharakteristik, vis. Einschränkung, n = 46.....	73
Tabelle 4-8: Differenzierungsfähigkeit Lenkungscharakteristik, akust. Einschränkung, n = 46.....	74
Tabelle 4-9: Differenzierungsfähigkeit Fahrwerkscharakteristik, akust. Einschränkung, n = 48.....	87
Tabelle 5-1: Versuchsfaktoren der Versuchsreihe Längsdynamik.....	98
Tabelle 5-2: Versuchsfaktoren der Versuchsreihe Querdynamik	100
Tabelle 5-3: Versuchsfaktoren der Versuchsreihe Vertikaldynamik	102
Tabelle 5-4: Probandenkollektiv der Versuchsreihen im Fahrsimulator (n=28).....	107
Tabelle 5-5: Differenzierungsfähigkeit hinsichtlich der Motorcharakteristik, n = 56	109
Tabelle 5-6: Differenzierungsfähigkeit hinsichtlich der Lenkungscharakteristik, n = 56	110
Tabelle 5-7: Differenzierungsfähigkeit hinsichtlich der Fahrwerkscharakteristik, n = 56	117
Tabelle 6-1: Faktoren der GVS-Versuchsreihe Querdynamik	134
Tabelle 6-2: Probandenkollektiv der Versuche zum Einsatz eines GVS-Systems im Fahrsimulator (n=15)	138
Tabelle 6-3: Differenzierungsfähigkeit hinsichtlich der Lenkungscharakteristik, n = 30	141



Anhang

Anhang A Übersicht der objektiven Versuchsdaten

Die folgende Symbolik gilt in allen Übersichtsdarstellungen von Anhang A:

Symbol	Erklärung
*	$\alpha < .05$
**	$\alpha < .01$
***	$\alpha < .001$
	Teststärke $1-\beta < .80$
↑	Erhöhung des Kennwerts von Stufe A zu Stufe B
↓	Verringerung des Kennwerts von Stufe A zu Stufe B
η_p^2	Effektstärke
$\bar{r}$	Korrelation

Hinweis zur Berechnung der Korrelation $\bar{r}$: Bei mehr als zwei Faktorstufen wird der Wert als arithmetisches Mittel der z-transformierten Einzelkorrelationen gebildet.

A.1 Probandenstudien im Realfahrzeug (Kapitel 4)

A.1.1 Querdynamik - Faktor akustische Einschränkung

Kennwert	Faktor	Post-Hoc-Tests		
		Stufe 0 – Stufe 1	Stufe 0 – Stufe 2	Stufe 1 – Stufe 2
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	**	** (↑)	--	--
Minimum der Längsbeschleunigung	--	--	--	--
Durchschnittl. Querbeschleunigung	***	*** (↑)	* (↑)	
Maximale Querbeschleunigung	*	--	--	--
Durchschnittl. Giergeschwindigkeit	***	*** (↑)	* (↑)	
Durchschnittl. Lenkradwinkelgeschwindigkeit	**	** (↑)	* (↑)	--
Standardabw. des Lenkradwinkels	--	--	--	--
Maximaler Lenkradwinkel	*	--	* (↑)	--
Lenkfrequenzverhältnis	*	--	--	--
Lenkrückstellrate	--	--	--	--

Kennwert	Faktor akustische Einschränkung $\eta_p^2 / \bar{r}$
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	.23 / .95
Minimum der Längsbeschleunigung	.06 / .80
Durchschnittl. Querb beschleunigung	.28 / .95
Maximale Querb beschleunigung	.14 / .94
Durchschnittl. Giergeschwindigkeit	.29 / .95
Durchschnittl. Lenkradwinkelgeschwindigkeit	.25 / .93
Standardabw. des Lenkradwinkels	.10 / .90
Maximaler Lenkradwinkel	.15 / .79
Lenkfrequenzverhältnis	.12 / .58
Lenkrückstellrate	.08 / .65

A.1.2 Querdynamik - Faktor visuelle Einschränkung

Kennwert	Faktor	Post-Hoc-Tests		
	Visuelle Einschränkung	Stufe 0 – Stufe 1	Stufe 0 – Stufe 2	Stufe 1 – Stufe 2
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	***	--	*** (↓)	--
Minimum der Längsbeschleunigung	--	--	--	--
Durchschnittl. Querb beschleunigung	**	--	*** (↓)	--
Maximale Querb beschleunigung	***	* (↓)	*** (↓)	--
Durchschnittl. Giergeschwindigkeit	**	--	** (↓)	--
Durchschnittl. Lenkradwinkelgeschwindigkeit	**	--	** (↓)	--
Standardabw. des Lenkradwinkels	**	--	** (↓)	--
Maximaler Lenkradwinkel	**	--	* (↓)	--
Lenkfrequenzverhältnis	--	--	--	--
Lenkrückstellrate	--	--	--	--

Kennwert	Faktor visuelle Einschränkung $\eta_p^2 / \bar{r}$
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	.30 / .94
Minimum der Längsbeschleunigung	.02 / .72
Durchschnittl. Querb beschleunigung	.23 / .93



Maximale Querschleunigung	.29 / .93
Durchschnittl. Giergeschwindigkeit	.21 / .93
Durchschnittl. Lenkradwinkelgeschwindigkeit	.22 / .91
Standardabw. des Lenkradwinkels	.20 / .87
Maximaler Lenkradwinkel	.22 / .83
Lenkfrequenzverhältnis	.10 / .51
Lenkrückstellrate	.04 / .50

A.1.3 Vertikaldynamik – Faktor akustische Einschränkung

Kennwert	Faktor	Post-Hoc-Tests		
		Stufe 0 – Stufe 1	Stufe 0 – Stufe 2	Stufe 1 – Stufe 2
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	**	** (↑)	* (↑)	--

Kennwert	Faktor akustische Einschränkung $\eta_p^2 / \bar{r}$
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	.29 / .90

A.2 Probandenstudien im Fahrsimulator (Kapitel 5)

A.2.1 Querdynamik – Faktor Fahrtwiederholung / Faktor Simulatorkonfiguration

Kennwert	Faktor Fahrtwiederholung	Faktor Simulatorkonfiguration
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	--	--
Minimum der Längsbeschleunigung	--	--
Durchschnittl. Querschleunigung	--	--
Maximale Querschleunigung	--	--
Durchschnittl. Giergeschwindigkeit	* (↑)	--
Durchschnittl. Lenkradwinkelgeschwindigkeit	--	** (↑)
Standardabw. des Lenkradwinkels	--	* (↑)
Maximaler Lenkradwinkel	--	--
Lenkfrequenzverhältnis	--	* (↑)
Lenkrückstellrate	--	** (↑)

Kennwert	Faktor Fahrtwiederholung $\eta_p^2 / \bar{r}$	Faktor Simulatorkonfiguration $\eta_p^2 / \bar{r}$
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	.08 / .81	.01 / .74
Minimum der Längsbeschleunigung	.02 / .74	.09 / .75
Durchschnittl. Querb beschleunigung	.08 / .83	.02 / .78
Maximale Querb beschleunigung	.02 / .71	.06 / .76
Durchschnittl. Giergeschwindigkeit	.14 / .82	.07 / .76
Durchschnittl. Lenkradwinkelgeschwindigkeit	.02 / .83	.33 / .74
Standardabw. des Lenkradwinkels	.02 / .66	.14 / .69
Maximaler Lenkradwinkel	.05 / .62	.10 / .68
Lenkfrequenzverhältnis	.00 / .77	.23 / .55
Lenkrückstellrate	.00 / .83	.28 / .77

A.2.2 Vertikaldynamik - Faktor Fahrtwiederholung / Faktor Bewegungsplattform

Kennwert	Faktor Fahrtwiederholung	Faktor Simulatorkonfiguration
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	** (↑)	--

Kennwert	Faktor Fahrtwiederholung $\eta_p^2 / \bar{r}$	Faktor Simulatorkonfiguration $\eta_p^2 / \bar{r}$
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	.32 / .86	.05 / .68

A.3 Probandenstudien zu Fahrsimulatortechnologie (Kapitel 6)

A.3.1 Querdynamik – Faktor GVS-System

Kennwert	Faktor Simulator- konfiguration	Post-Hoc-Tests		
		stat. – stat. GVS	stat. – dyn. GVS	stat. GVS – dyn. GVS
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	--	--	--	--
Minimum der Längsbeschleunigung	--	--	--	--
Durchschnittl. Querb beschleunigung	--	--	--	--
Maximale Querb beschleunigung	--	--	--	--
Durchschnittl. Giergeschwindigkeit	--	--	--	--



Durchschnittl. Lenkradwinkelgeschwindigkeit	--	--	--	--
Standardabw. des Lenkradwinkels	**	* (↓)	--	--
Maximaler Lenkradwinkel	*	* (↓)	--	* (↑)
Lenkfrequenzverhältnis	--	--	--	--
Lenkrückstellrate	--	--	--	--

Kennwert	Faktor Simulatorkonfiguration $\eta_p^2 / \bar{r}$
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	.06 / .40
Minimum der Längsbeschleunigung	.07 / .05
Durchschnittl. Querbeschleunigung	.10 / .39
Maximale Querbeschleunigung	.08 / .38
Durchschnittl. Giergeschwindigkeit	.17 / .23
Durchschnittl. Lenkradwinkelgeschwindigkeit	.16 / .52
Standardabw. des Lenkradwinkels	.32 / .56
Maximaler Lenkradwinkel	.32 / .55
Lenkfrequenzverhältnis	.17 / .52
Lenkrückstellrate	.15 / .60

Anhang B Erfassung subjektiver Daten

B.1 Übergreifend eingesetzte Fragebögen

B.1.1 Personenbezogener Fragebogen

VP

Personenbezogener Fragebogen

Die folgenden personenbezogenen Angaben werden anonym ausgewertet und vertraulich behandelt.

Alter	Jahre
Geschlecht	☐ weiblich ☐ männlich
Körpergröße	cm

Welche Fahrerlaubnisklassen besitzen Sie?	☐ PKW	seit	Jahren
	☐ Motorrad	seit	Jahren
	☐ LKW	seit	Jahren
	☐ Sonstige:	seit	Jahren
Wie viele Kilometer fahren Sie aktuell im Jahresdurchschnitt?	☐ weniger als 5.000 km	☐ 5.000 – 10.000 km	
	☐ 10.000 – 20.000 km	☐ mehr als 20.000 km	

Beruf	
Fachrichtung	
Führen Sie beruflich Test-/ Versuchsfahrten durch?	☐ ja ☐ nein
Erfahrungen mit Fahrsimulatoren	☐ keine ☐ Spiele-konsole ☐ statischer Fahrsim. ☐ dynam. Fahrsim.
Erfahrungen mit anderen Simulatoren	☐ keine ☐ Flugsim. ☐ Sonstige:

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!



B.1.2 Skala zur Selbsteinschätzung der Beurteilungssicherheit

sehr sicher	sicher	neutral	unsicher	sehr unsicher
+ 0 -	+ 0 -	+ 0 -	+ 0 -	+ 0 -

B.2 Fragebögen der GVS-Studie

B.2.1 Subjektivbewertung des GVS-Systems

VP

Fahrt mit GVS-System

Bewertung Beschleunigungsempfinden

Wie real erschien Ihnen ...

nicht real  vollkommen real

- - - - - 0 + ++ +++

die Beschleunigungs-
richtung?

links
rechts

die Beschleunigungs-
intensität?

links
rechts

der Zeitpunkt des
Auftretens der
Beschleunigung?

links
rechts

B.2.2 Simulator Sickness Questionnaire

VP

Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

Bitte geben Sie an, ob, und wenn ja, wie stark die folgenden Symptome im Moment bei Ihnen auftreten. Zum Abschluss des Experiments werden Sie erneut gebeten diesen Fragebogen auszufüllen.

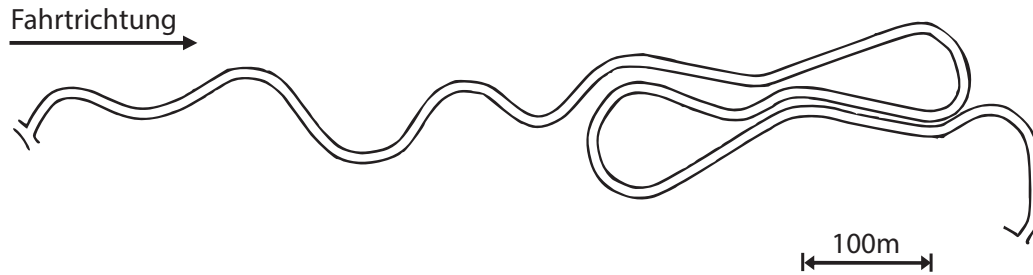
Symptome	gar		mittel-	
	nicht	leicht	mäßig	stark
allgemeines Unbehagen/ Unwohlsein	☐	☐	☐	☐
Ermüdung	☐	☐	☐	☐
Kopfschmerzen	☐	☐	☐	☐
überanstrengte Augen	☐	☐	☐	☐
Schwierigkeiten mit Sehschärfe	☐	☐	☐	☐
erhöhte Speichelbildung	☐	☐	☐	☐
Schwitzen	☐	☐	☐	☐
Übelkeit/ Erbrechen	☐	☐	☐	☐
Konzentrationschwierigkeiten	☐	☐	☐	☐
Druckgefühl im Kopfbereich	☐	☐	☐	☐
verschwommene Sicht	☐	☐	☐	☐
Schwindel (bei geöffneten Augen)	☐	☐	☐	☐
Schwindel (bei geschlossenen Augen)	☐	☐	☐	☐
Gleichgewichtsstörungen	☐	☐	☐	☐
Magenbeschwerden	☐	☐	☐	☐
Aufstoßen	☐	☐	☐	☐



Anhang C Versuchsstrecken

C.1 Teststrecke Querdynamik

Schematischer Streckenverlauf



C.2 Teststrecke Vertikaldynamik

Beispielhafte Abbildung der Fahrbahnbeläge







